

Jukka Vainio

OHJELMISTORADIO

Tietoliikenteen koulutusohjelma
2013

OHJELMISTORADIO

Vainio, Jukka
Satakunnan ammattikorkeakoulu
Tietotekniikan koulutusohjelma
Marraskuu 2013
Ohjaaja: Aromaa, Juha DI
Sivumäärä: 59
Liitteitä: -

Asiasanat: radiotekniikka, ohjelmistoradio, radiovastaanotin

Opinnäytetyössä tutustuttiin radiotekniikan historiaan ja teoriaan kirjallisuutta ja Internetiä hyödyntäen. Tämän jälkeen tutustuttiin ohjelmistoradioon ja GNU Radio-projektiin.

Työssä testattiin GNU Radiota käytännössä Ettus Researchin radiolaitteen avulla. GNU Radion avulla saatiin poimittua radiolähetyksiä talteen ja muutettua ne digitaaliseen muotoon. GNU Radion avulla radiosignaalia saatiin käsiteltyä, tallennettua ja lähetettyä eteenpäin. Radiospektrin muusta sisällöstä saatiin myös käytännön havain-
toja.

SOFTWARE DEFINED RADIO

Vainio, Jukka

Satakunnan ammattikorkeakoulu, Satakunta University of Applied Sciences

Degree Programme in information technology

November 2013

Supervisor: Aromaa, Juha M.Sc.

Number of pages: 59

Appendices: -

Keywords: radio technology, software defined radio, radio receiver

Thesis was on software defined radio. The history and theory of radio engineering were investigated by utilizing literature and Internet. After this, software defined radio and the GNU Radio project were examined.

GNU Radio was tested in practice using a radio device by Ettus Research. Radio transmissions were captured and converted into digital form with the help of GNU Radio. Radio signals were processed, stored and transmitted forward. There were also practical observations of the rest of the radio spectrum's content.

SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	6
2	RADIOTEKNIIKAN TEORIAA.....	7
2.1	Historiaa.....	7
2.2	Sähkömagnetismin perusteet	8
2.2.1	Maxwellin yhtälöt.....	10
2.2.2	Sähkömagneettinen spektri.....	13
2.3	Modulaatio ja demodulaatio	13
2.3.1	AM	16
2.3.2	FM	17
2.3.3	Digitaalinen modulaatio	19
2.4	Suodattimet	22
2.5	Kohina.....	23
2.6	Radiovastaanottimet.....	27
3	GNU RADIO.....	30
3.1	Työympäristön asennus	30
3.2	Ohjelmiston asennus	34
3.3	GNU Radion käyttö	37
4	YHTEENVETO	58
	LÄHTEET.....	59

LYHENTEET

AD	Analog to Digital
AM	Amplitude Modulation
ASK	Amplitude-Shift Keying
BER	Bit Error Rate
BIOS	Basic Input-Output System
DA	Digital to Analog
DSP	Digital Signal Processor
FFT	Fast Fourier Transform
FM	Frequency Modulation
FSK	Frequency-Shift Keying
GUI	Graphical User Interface
HF	High Frequency
HZ	Hertz
IEEE	The Institute of Electrical and Electronics Engineers
IP	Internet Protocol
PSK	Phase-Shift Keying
RC	Resistance/Capacitance
SSB	Single-Sideband modulation
S/N	Signal to Noise-ratio
TV	Television
UHD	USRP Hardware Driver
ULA	Ultra Shortwave
USRP	Universal Software Radio Peripheral
VHF	Very High Frequency
WAV	Waveform Audio File Format
WBFM	Wide Band Frequency Modulated

1 JOHDANTO

Radiosignaaleja on historian saatossa totuttu käsittelemään analogisessa muodossa ja pitkään nuo signaalit kulkivat monimutkaisien virtapiirien läpi ennen kuin ihminen pääsi informaatiota aistimaan. Teknologian kehittyessä ja digitalisoinnin avulla toimintamallit ovat muuttuneet ja radioliikenteen määrä sekä erilaiset käyttökohteet ovat lisääntyneet huimasti. Yhtenä seuraavista suurista muutoksista voidaan nähdä ohjelmistoradion läpimurto.

Opinnäytetyössä tutustutaan radiotekniikan historiaan sekä teoriaan ja selvitetään, miten ohjelmistoradio toimii. Tavoitteena on vastaanottaa ja käsitellä radiolähetystä GNU Radion avulla. Tämän mahdollistamiseksi käyttöön otettiin myös radiolähetysset poimiva Ettus Researchin radiolaite.

Työn käytännön osuudessa käydään läpi tarvittavan työympäristön asennus ja tämän jälkeen testataan GNU Radiota käytännössä ja kuvaillaan sen toimintaa.

2 RADIOTEKNIIKAN TEORIAA

2.1 Historiaa

Sana radio tarkoittaa laitetta, jota käytetään radioaaltojen vastaanottamiseen ja lähettämiseen. Sana tarkoittaa myös tekniikkaa, jota käyttäen informaatiota siirretään avaruudessa, ilmakehässä tai aaltojohdossa etenevien sähkömagneettisten aaltojen avulla. Nämä aallot ovat radioaaltoja. [1]

Sähkömagneettisen aaltoliikkeen teorian esitti ensimmäisenä James Clerk Maxwell. Tämä tapahtui vuonna 1873. Heinrich Rudolf Hertz vei vuosien 1886 ja 1888 välisenä aikana kokeellisesti eteenpäin Maxwellin teorian tutkimuksia. Radion keksijästä on kiistelty jatkuvasti. [5]

Serbialaissyntyinen Nikola Tesla teki Vuonna 1893 St. Louisissa Missourissa ensimmäisen julkisen radiolähetydemonstraation laitteella, joka sisälsi kaikki radion elementit, jotka olivat laitteissa ennen elektroniputken keksimistä. [5]

Radiolaitteita kehittäneiden alan pioneerien tukena ei ollut aluksi valmiita suunnittelumenetelmiä. Tulosta toi vain vuosikausien työ yrityksineen ja erehdyksineen. Teoreetikoilta ei juuri saanut tukea, joten tarvittiin kovaa uskoa omiin ajatuksiin. Usein uusi oivallus pyrittiin osoittamaan laskelmin mahdottomaksi. Edelläkävijöiden piti ottaa suuria taloudellisia riskejä ja houkutella rahoittajia hankkeilleen. Myös kilpailijat vaikeuttivat elämää, sillä patenteista tuli jatkuvasti riitaa. Näiden pioneerien jälkeen radioamatöörit ovat usein olleet eturintamassa avaamassa uusia polkuja. Myöhemmin radiotekniikka on kypsynyt, laajentunut ja monimutkaistunut niin paljon, että pioneeri- ja amatöörihenki eivät enää riitä. Laitteiden kehitystyöstä on tullut entistä tärkeämpää ja suurten yhtiöiden, yliopistojen, armeijan tutkimuslaitosten ja avausjärjestöjen resurssit vievät työtä eteenpäin. [2]

Brittifysiikko Sir Oliver Lodge käytti vuonna 1894 omassa demonstraatioissaan ilmaisineläitetta, jota kutsuttiin kohereeriksi. Venäläinen Aleksandr Popov ja ranskalainen Edouard Branly esittelivät myöhemmin parannetut versiot kyseisestä laitteesta. Popov oli ensimmäisiä, joka kehitti kohereerista käytännölliseen radiotoimintaan soveltuvia laitteita. Hän teki radiolähetyskokeilujaan myös Suomessa vuonna 1900. [5]

Kansainvälisen tekniikan alan järjestön IEEE:n mukaan Aleksandr Popov osoitti ensimmäisenä radiotekniikan hyödyllisyyden ja ylipäätään olemassaolon 7.5.1895 Venäjän fysiikan ja kemian seuran kokouksessa. [7]

Maailman ensimmäinen ääntä sisältävä radiolähetys oli 24.12.1906. Reginald Fessenden luki raamatun säkeitä ja lähetti viulunsoittoaan Brant Rockissa Massachusettsissa. Kaupallinen radiotoiminta alkoi pian tämän jälkeen. [5]

Radion kehitykseen vaikuttivat 1900-luvulla eniten keksinnöt kuten transistori, amplitudimodulaatio (AM), taajuusmodulaatio (FM) ja SSB (single-sideband modulation). Nykyisin radio-ohjelmia voi kuunnella myös Internetin välityksellä. Internet-radiolla valittavana on jopa tuhansien asemien valikoima. [5]

2.2 Sähkömagnetismin perusteet

Sähkömagnetismi on fysiikan ala, joka käsittelee sähköisiä ja magneettisia ilmiöitä sekä niiden välisiä riippuvuuksia. Sähkömagnetismin pohjan luojana voidaan pitää James Clerk Maxwelliä. Maxwellin yhtälöiden mukaan sähkömagneettisessa kentässä muuttuva magneettikenttä luo muuttuvan sähkökentän, joka vastaavasti synnyttää muuttuvan magneettikentän. Tästä seuraa etenevä sähkömagneettisen säteilyn aalto-liike. [5]

Käytännössä lähes kaikki ilmiöt, joita kohtaamme arjessa ydinvoiman mittakaavan yläpuolella voidaan selittää sähkömagneettisella voimalla. Poikkeuksen tekee Painovoima. Periaatteessa kaikki atomien vuorovaikutuksessa mukana olevat voimat voidaan selittää sähkömagneettisella voimalla. Tämä voima vaikuttaa sähköisesti varautuneisiin atomien ytimiin ja elektroneihin atomin ympärillä ja sen sisällä. [6]

Sähkövaraus on aineen perusominaisuus. Sähkövaraus voidaan havaita, koska varautuneiden kappaleiden tai hiukkasten välillä vaikuttaa voima, joka on verrannollinen varauksien suuruuden tuloon ja kääntäen verrannollinen varauksien välisen etäisyyden neliöön. Tämä väittämä tunnetaan Coulombin lakina [2]

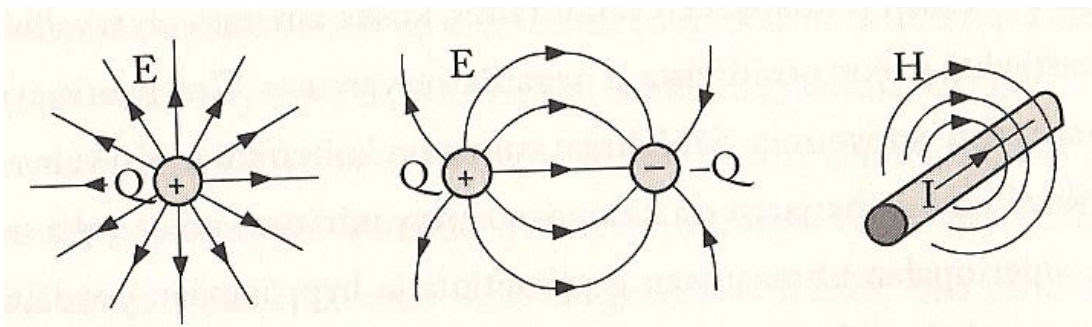
Sähkövarausta on sekä positiivista että negatiivista. Samanmerkkisten varauksien välillä on poistovoima ja vastakkaismerkkisten välillä on vetovoima. Tavallisessa aineessa varauksen kantajia ovat positiivisesti varautuneet protonit ja negatiivisesti varautuneet elektronit. Atomien kolmannet tekijät, neutronit, ovat neutraaleja eli niillä ei ole varausta. Protonien ja elektronien varauksen suuruus on sopimassamme yksikköjärjestelmässä likimain $1,6 \cdot 10^{-16}$ coulombia. Tätä varauksen määrää kutsutaan alkeisvaraukseksi. [2]

Radiosäteily etenee avaruudessa rajattomasti, vaikka säteilylähde poistettaisiin. Vanhimmat radiolähetykset ovat saaneet alkunsa vajaat 100 vuotta sitten ja niiden aiheuttamat radioaallot ovat ehtineet nyt vajaan 100 valovuoden etäisyydelle maasta. Aallot vaimenevat etäisyyden neliöön verrannollisina, joten ne ovat jo heikenneet käytännössä kuulumattomiin. [4]

Yksi sähkövarauksen tärkeistä ominaisuuksista ilmenee varauksen ollessa suhteellisessa liikkeessä toiseen varaukseen nähden. Kahden tavallisen ja varaamattoman metallijohtimen ollessa vierekkäin, niiden välille ei synny sähköistä voimaa, koska johtimella ei ole nettovarausta. Positiivisia ja negatiivisia varauksia on siis käytännössä yhtä paljon, joten niiden vaikutukset neutralisoivat toisensa. Jos johtimissa kulkee virta, niiden välillä on virtojen suunnista ja suuruuksista riippuva voima. Liikkuva varaus synnyttää ympärilleen magneettikentän, jossa liikkuvaan toiseen varauksen kohdistuu voima. Tyhjiössä kulkevien elektronisuihkujen muodostamien virtojen välillä vaikuttavat sekä magneettikentän, että sähkökentän aiheuttamat voimat. [2]

Sähkö- ja magneettikenttiä voidaan havainnollistaa kenttäviivoilla. Viivojen suunta kuvaa sitä, miten kentän suunta vaihtelee paikasta toiseen. Sopivasti piirrettynä viivojen tiheys vastaa kentän voimakkuutta. Kuvassa 1 on esimerkkejä kenttäviivoista. Sähkökentän suunta kertoo, mihin päin kenttään asetettuun positiiviseen varaukseen

kohdistuva voima osoittaa. Negatiiviseen varaukseen kohdistuva voima osoittaa vastakkaiseen suuntaan. [2]



Kuva 1. Esimerkkejä kenttäviivoista. Skannattu [2, sivu 53]

Liikkuvien varausten muodostama tasavirta aiheuttaa siis magneettikentän ja paikallaan oleva varaus aiheuttaa ympärilleen sähkökentän. Tällaiset kentät ovat ajan suhteen vakioita eli staattisia. Staattisessa tilanteessa magneettikenttä ja sähkökenttä ovat toisistaan riippumattomia. Jos varaus taas on kiihtyvässä liikkeessä, kentissä tapahtuu muutos, joka kytkee kentät toisiinsa. Tällöin syntyy sähkömagneettinen aalto, joka etenee ja kuljettaa energiaa avaruuden halki valon nopeudella. Muun muassa lämpöliikkeen liikutteleva varaus tai antennissa edestakaisin liikkuva elektroni synnyttävät sähkömagneettisia aaltoja [2]

2.2.1 Maxwellin yhtälöt

Sähkömagnetismi perustuu skotlantilaisen fyysikon James Clerk Maxwellin 1860-luvulla kehittämiin yhtälöihin. Ne muodostavat radiotekniikan ja koko sähkötekniikan perustan. Yhtälöiden oikeutus perustuu niiden kykyyn ennustaa oikein sähkömagneettiset ilmiöt. Ne perustuvat kokeelliseen tutkimukseen, eikä niitä voi johtaa muista perustotuksista. [1,4]

Tuolloin sähköstä ja magnetismista tiedettiin mm. seuraavat peruslait:

1. Suljetun pinnan läpi kulkeva kokonaissähkövuoto on yhtä suuri kuin kyseisen pinnan sisällä olevien sähkövarauksien summa. Sähkövaraukset toimivat sähkövuon ”lähteinä”, eli sähkökenttä on luonteeltaan lähdekenttä. [4]

2. Kokonaismagneettivuo minkä tahansa suljetun avaruuspinnan läpi on nolla. Toisin sanoen samat magneettivuoviivat, mitkä menevät pinnan läpi sisälle, tulevat myös sen läpi ulos. Magneettikentällä ei ole lähteitä, vaan magneettiset vuoviivat ovat aina suljettuja viivoja. Matemaattisesti ilmaistuna magneettikenttä on pyörrekenttä. [4]

3. Muuttuva magneettivuo synnyttää sähkökentän. Tämä näkyy Faradayn induktiolain mukaisena induktiolähdejännitteinä. [4]

4. Sähkövirta eli liikkuva sähkövaraus aiheuttaa virrallisen johtimen ympärille magneettikentän. Magneettikentän voimakkuus ja magneettivuon tiheys voidaan laskea Biot-Savartin tai Amperen lakien avulla. [4]

Differentiaalimuodossa ilmaistuna Maxwellin yhtälöt kuvaavat kuinka sähkömagneettiset vektorikentät vastaavat toisiaan pisteittäin. Kaksi ensimmäistä yhtälöä ovat Gaussin lait sähkö- ja magneettikentille, kolmas Faradayn induktiolaki ja viimeinen Ampère-Maxwellin laki. Differentiaalimuotoiset yhtälöt ovat [5]

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t},$$

missä

\mathbf{D} on sähkövuon tiheys,

ρ on varaustiheys,

\mathbf{B} on magneettivuon tiheys,

\mathbf{E} on sähkökentän voimakkuus,

\mathbf{H} on magneettikentän voimakkuus,

\mathbf{J} on sähkövirran tiheys.

Merkintä $\nabla \cdot$ (nabla piste) tarkoittaa vektorifunktion lähteisyyttä eli divergenssiä (yksikkönä 1/m). Merkintä $\nabla \times$ (nabla risti) sen pyörteisyyttä eli roottoria (yksikkönä 1/m). [5]

Maxwellin yhtälöistä kannattaa muistaa ainakin se, että kentät riippuvat varauksien ja virtojen jakaumista ja että sähkö- ja magneettikentät ovat sidoksissa toisiinsa. Tyhjässä avaruudessa, jossa ei ole virtoja eikä sähkövarauksia, yhtälöt ovat muodoltaan symmetrisiä magneettikentän ja sähkökentän suhteen. Yhtälöt olisivat symmetrisiä myös väliaineessa, mikäli erillisiä magneettivarausia olisi olemassa. Magneetilla on kuitenkin aina sekä etelänapa että pohjoisnapa. Tästä johtuen toisessa yhtälössä on nolla oikealla puolella. Yhtälöiden tärkeä viesti on se, että muuttuva magneettikenttä luo ympärilleen muuttuvan sähkökentän ja muuttuva ja päinvastoin. Tämä ketju jatkuu loputtomiin. Tähän perustuu sähkömagneettisten aaltojen ja siis samalla radioaaltojen olemassaolo. [2]

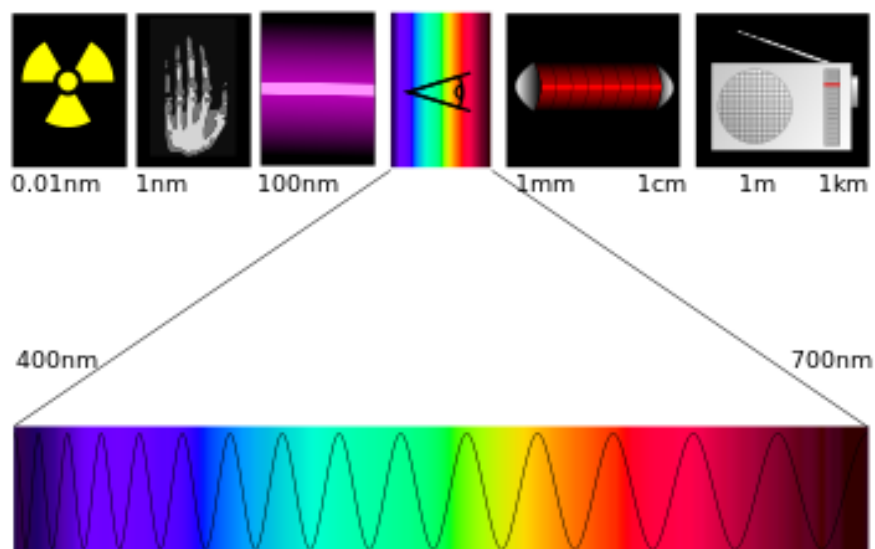
Maxwellin yhtälöt ovat tieteen saavutuksina verrattavissa Newtonin saavutuksiin mekaniikassa. Heinrich Hertzin mukaan yhtälöillä on kuin oma sielunsa ja enemmän viisautta Maxwellin teorian keksineillä ja sitä tutkineilla tiedemiehillä. Radion alkuaikoina yhtälöistä ei ollut vielä paljon hyötyä, koska pioneerityötä tehtiin yrityksen ja erehdyksen kautta eikä monimutkaisten laskujen tekemiseen ollut apuvälineitä. 2000-luvulla tilanne on toinen ja lukemattomat tietokoneet etsivät jatkuvasti ratkaisuja Maxwellin yhtälöihin. Niitä käytetään muun muassa antennien, nopeiden digitaalipiirien, monenlaisten mikroaaltokomponenttien sekä optoelektronikan komponenttien analysoinnissa ja suunnittelussa. Yhtälöt pätevät sähkömagneettisiin ilmiöihin tasavirrasta valoon ja vielä suuremmille taajuuksille. [2]

Niiden kattavuudesta huolimatta Maxwellin yhtälöt eivät ole täydellinen sähkömagnetismin matemaattinen kuvaus. Esimerkiksi atomin ydintä kiertävien elektronien pitäisi yhtälöiden mukaan säteillä energiaa ja syöksyä nopeasti ytimeen. Maxwellin yhtälöt toimivat hyvin makroskooppisessa maailmassa, mutta eivät päde sellaisenaan atomien ja kvanttien mikromaailmassa. [2]

2.2.2 Sähkömagneettinen spektri

Sähkömagneettinen spektri kattaa kaikki sähkömagneettisen säteilyn aallonpituus-alueet. Se jaotellaan osiin lähtien suurimmasta aallonpituudesta pienimpään: radioaallot, mikroaallot, infrapunasäteily, valo, ultraviolettisäteily, röntgensäteily ja gammasäteily.[8]

Sähkömagneettisen spektrin osat jaotellaan niiden säteilyn aallonpituuden tai taajuuden mukaan. Tietyn sähkömagneettisen säteilylähteen spektri tarkoittaa sen emittoimien taajuuksien joukkoa. Taajuuden yksikkö on hertsi (Hz), joka ilmoittaa värähdysten lukumäärän sekunnissa. Aallonpituuden mittayksikkö on metri. Kuvassa 2 näkyy sähkömagneettinen spektri graafisessa muodossa.[5]



Kuva 2. Sähkömagneettinen spektri. Kuvassa sähkömagneettisen spektrin aallonpituudet lyhimmästä pisimpään: 0,01nm gamma- eli ydinsäteily, 1nm röntgensäteily, 100nm ultraviolettisäteily, 400-700nm näkyvä valo, 1mm-1cm infrapuna- ja lämpösäteily, 1m-1km radioaallot.

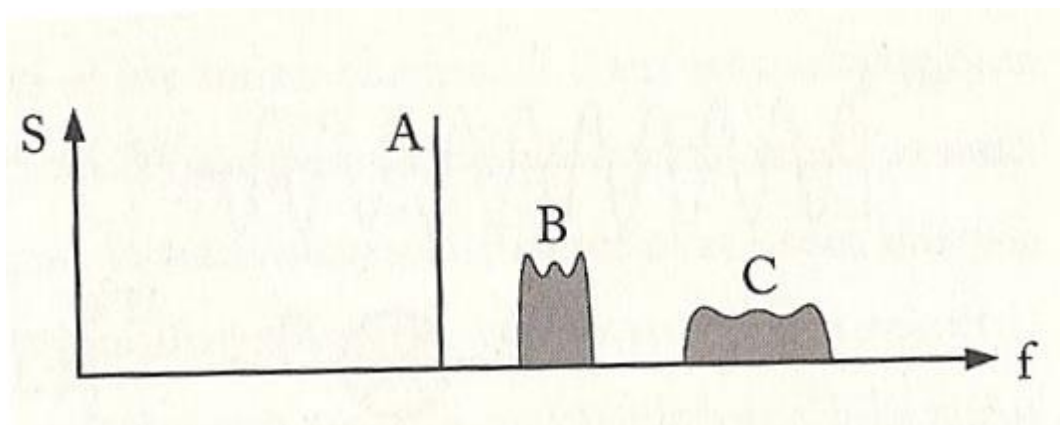
2.3 Modulaatio ja demodulaatio

Modulaatio tarkoittaa tietoliikennetekniikassa ja elektroniikassa signaalin muokkaamista toista signaalia käyttäen. Demodulaatio on sen käänteisoperaatio. Tietoa sisältävää moduloivaa signaalia kutsutaan kantataajuussignaalksi. Tiedon liittämistä kan-

toaalloon kutsutaan modulaatioksi ja tiedon erottamista moduloidusta signaalista puolestaan demodulaatioksi. ”Tiedolla” tarkoitetaan tässä yhteydessä vasta esimerkiksi jännitteen arvoa. Tämän vaihtelevan jännitteen muuntaminen ihmiselle tai sitä käsittelevälle laitteelle merkitykselliseksi tiedoksi tai vaatii usein monimutkaista tietoliikennestandardien mukaista tulkintaa, jonka jää vastaanottimen demodulaattorin jälkeisten elektroniikkapiirien hoidettavaksi. Yksinkertaisin tapa kantoaallon modulointiin on katkoa sitä morsemerkkien tahdissa. Tämä on vanhin radioaaltojen käyttötapa tiedonsiirtoon. Radiotekniikan alkuaikoina radiota kutsuttiinkin langattomaksi sähkölennättimeksi. Morse-merkkien tahdissa katkotun kantoaallon vastaanottajalta menetelmä vaatii morse-merkkien lukutaitoa. Ääni- ja kuvainformaation lisäämistä kantoaaltoon kutsutaan kantoaallon moduloinniksi. Vasta informaatiota sisältävä kantoaalto on vastaanottajan kannalta mielekästä. Radiovastaanottimessa tapahtuu modulaatiolle vastakkainen toimenpide, kantoaaltoon liitetyn hyötysignaalin ilmaisu eli demodulaatio. [2,4,5]

Siirrettävä tieto, kuten vaikkapa puhe tai musiikki, muutetaan ensin matalataajuiseksi sähköiseksi signaaliksi. Tätä kantataajuussignaalia ei voida suoraan lähettää radiokanavaa pitkin vaan se syötetään ensin modulaattoriin, joka muuttaa suurtaajuisen signaalin jotain ominaisuutta (taajuutta, amplitudia, vaihetta) kantataajuussignaalin tahdissa. Näin syntynyt suurtaajuinen signaali lähetetään antennilla. Vastaanottimessa signaali normaalisti sekoitetaan matalammalle välitaajuudelle. Seuraavaksi demodulaattori erottaa moduloidusta signaalista alkuperäisen signaalin, joka voidaan muuttaa taas esimerkiksi ääniaalloksi. Toisin sanoen modulaattori liittää informaation kantoaaltoon, josta se demodulaattorilla taas erotetaan. [1]

Moduloimattoman sinimuotoisen kantoaallon spektri sisältää vain yhtä taajuutta. Moduloitu signaali taas koostuu eri taajuisista sinisignaaleista. Jos näillä komponenteilla on sopivat amplitudit ja vaiheet, saadaan summana juuri tuo moduloitu signaali. Modulaatio levittää siis signaalin vaatimaa taajuuskaistaa eli signaalin spektriä (kuva 3). Mitä enemmän tietoa lähetetään eli mitä tiheämmässä aallossa on modulaation aiheuttamia muutoksia, sitä leveämpi on signaalin spektri. Nopea tiedonsiirto vaatii siis laajan kaistan. Radiotaajuuksien spektrin rajallisuudesta johtuen sen osien arvo on myös huomattavan suuri. [2]



Kuva 3. Signaalin spektri eli tehotiheys S (wattia hertsiä kohti) taajuuden funktiona: A on moduloimaton signaali, B ja C ovat moduloituja signaaleja. Skannattu [2, sivu 130]

Modulaatiomenetelmiä on olemassa monia. Ne voidaan jakaa digitaalisiin ja analogisiin menetelmiin. Analogisessa modulaatiossa esimerkiksi kanta-aallon amplitudi tai taajuus muuttuu portaattomasti moduloivan signaalin tahdissa. Digitaalisessa modulaatiossa taas lähetetään määrättyjä symboleita. Digitaalisesta televisiosta tai radiosta puhuttaessa tarkoitetaan, että nimenomaan radioaalto on moduloitu digitaalseksi, sillä laitteessa olevat digitaaliset piirit eivät tee järjestelmästä digitaalista. Modulaatio on tärkeää monilla radiotekniikan osa-alueilla. Paitsi tietoliikenteessä (radiolinkit, yleisradio, matkapuhelimet) modulaatiolla on sovelluksia myös muun muassa tutkatekniikassa ja radionavigoinnissa. [1,2]

Analogisessa tiedonsiirrossa signaalin aaltomuodon vaurioita ei enää pystytä korjaamaan. Digitaalisen modulaation vahvuus onkin siinä, että vastaanottimen tarvitsee vain erottaa symbolit toisistaan. Vaikka signaali on matkallaan vääristynyt tai siihen on tullut kohinaa, aaltomuodon muunto symboleiksi voi onnistua silti täydellisesti. Luokittelu on sitä helpompaa, mitä vähemmän symboleita on käytössä. Mitä enemmän symboleita moduloitu signaali voi sisältää, sitä suurempi on virhetulkintojen vaata. Symboleiden lisäämistä tukee kuitenkin tietyllä taajuuskaistalla siirrettävän tiedon määrän kasvaminen. [2]

2.3.1 AM

Amplitudimodulaatiota käytetään muun muassa radiolähetyksissä lyhyillä, keskipitkillä ja pitkällä aalloilla. Ääni on pieniä paineenvaihteluita ilmassa ja nämä vaihtelut saavat esimerkiksi mikrofoniin joustavan kalvon värähtelemään. Mikrofonin muuttamat akustisen aallon aiheuttamat kalvon heilahtelut sähköiseen muotoon. Tällä signaalilla moduloidaan kantoaallon amplitudia eli voimakkuutta. [2]

Vastaanottimessa signaalia suodatetaan ja vahvistetaan. Signaali voidaan myös sekoittaa matalammalle välitaajuudelle. Lopulta ilmaisimella erotetaan verhoikäyrän moduloidusta signaalista. Ilmaisimesta signaali voidaan kytkeä sitten suoraan esimerkiksi kaiuttimiin. [2]

Amplitudimodulaation puolesta puhuu lähes yksinomaan vastaanottimien yksinkertaisuus ja halpuus. Nykyisin AM-radiovastaanotin voidaan toteuttaa halvalla mikropiirillä ja muutamalla oheiskomponentilla. Modulaatiomenetelmään liittyy vakavia haittoja. Näitä ovat: [4]

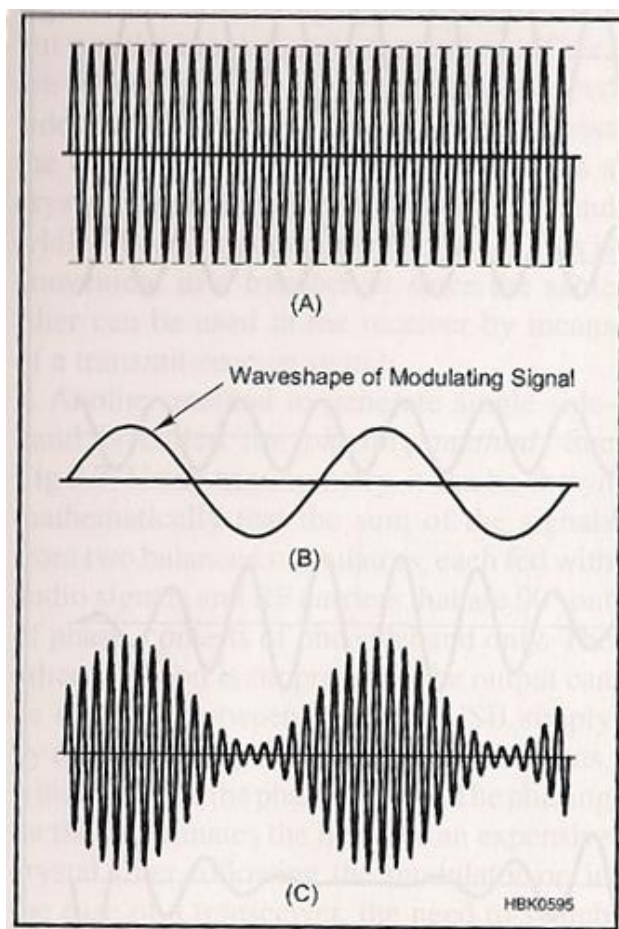
1. Sama informaatio lähetetään kahteen kertaan, kerran alemmassa ja kerran ylemmässä sivunauhassa vaikka toinen sivunauha on informaation siirron kannalta hyödytön. Kuitenkin se vie taajuustilaa muutenkin ylikuormitetuilla yleisradioalueilla. AM-yleisradio vaatii 9 kHz taajuuskaistan, josta vain osa on hyödyllistä kaistaa. Äänentoiston taso on kuitenkin vaatimaton. [4]

2. Kantoaalto ei sisällä informaatiota, mutta se vie suurimman osan lähetteen tehosta. Jos modulaatioindeksi on puheelle tyypillinen 20 %, on AM-yleisradioaseman kantoaaltotehon ollessa 100 kW kummankin sivunauhan kokonaisteho vain 20 kW. Kokonaistehosta jopa yli 90 % on hukкатаhoa. [4]

3. Modulaatiomenetelmä on arka ulkoisille häiriöille, kuten ukkoselle, kipinähäiriöille, muiden radioasemien häiriöille ym. Tästä johtuen kuuluvuus on usein heikko. [4]

Amplitudimodulaatio on sekä ammatillisessa että radioamatööri liikenteessä syrjäytynyt. Myös yleisradiotekniikassa se on väistymässä. [4]

Kuvassa 4 on AM:n graafinen kuvaus. Moduloimattoman kanta-aallon (A) jokaisella syklillä on sama amplitudi. Kun moduloiva signaali (B) lisätään, kanta-aallon amplitudi kasvaa tai pienenee moduloivan signaalin amplitudin mukaan (C). [3]



Kuva 4. AM:n graafinen kuvaus. Skannattu [3, sivu 8.3]

2.3.2 FM

Amerikkalainen majuri Edwin Armstrong kehitti taajuusmodulaation 1930-luvulla. Sama mies kehitti aikaisemmin 1920-luvulla uuden radiovastaanotintyyppin, super-vastaanottimen, josta on tullut vastaanotintekniikan vakioratkaisu. FM:ssä eli taajuusmodulaatiossa kanta-aallon taajuutta muutetaan kantataajuussignaalin tahdissa. Tämä voi olla vaikkapa puhesignaali. Puhesignaalin jännitteen ollessa nolla, moduloidun signaalin taajuus on sama kuin kanta-aallon taajuus. Kun jännite on positiivinen, taajuus on suurempi kuin kanta-aallon taajuus, ja kun jännite on negatiivinen, taajuus on pienempi kuin kanta-aallon taajuus. Moduloidun signaalin amplitudi pysyy

samana, mutta hetkellinen taajuus muuttuu analogisesti puhesignaalin tahdissa. FM:n tärkeä etu AM:ään verrattuna on se, että esimerkiksi radion liikkumisesta johtuvat signaalin voimakkuuden vaihtelut eivät vaikuta taajuuteen. [2, 4]

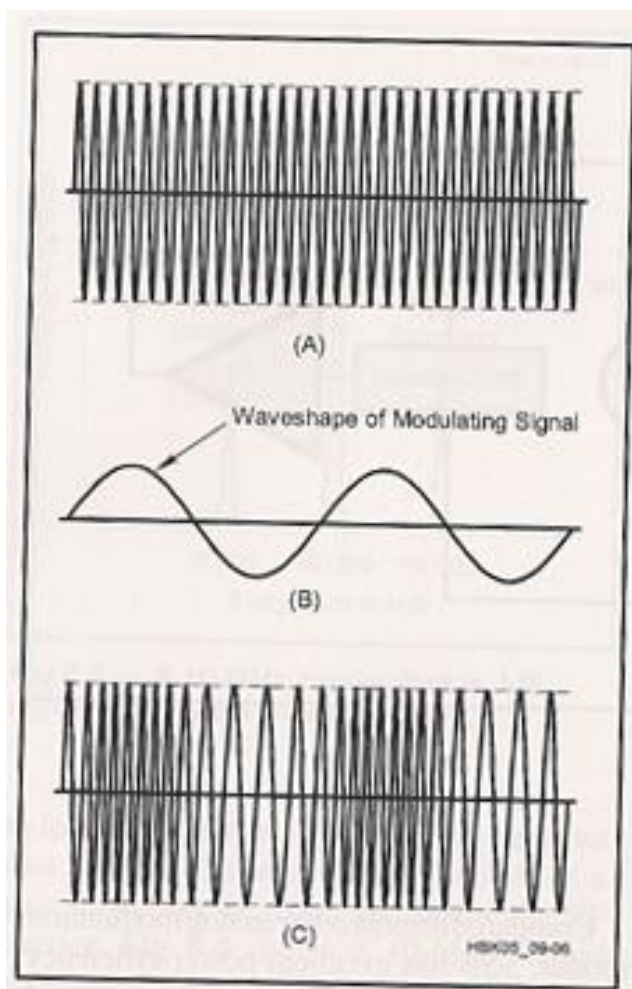
FM-signaali luodaan jännitteellä säädettävällä oskillaattorilla, jonka tuottaman signaalin taajuus riippuu ohjausjännitteestä. Vastaanottimessa demodulaation hoitaa käänteisesti toimiva piiri eli FM-ilmaisim. Ilmaisim tuottaa hetkelliseen taajuuteen verrannollisen jännitteen. FM-ilmaisim koostuu esimerkiksi piiristä, jonka vaimennus riippuu taajuudesta, ja tämän piirin jäljessä olevasta verhoikäyräilmaisimesta. [2]

Taajuusmodulaation ominaispiirre on kohina, jonka teho kasvaa taajuuden kasvaessa. Kohina on informaation kannalta hyödytöntä. Kohinan vaimentamiseksi ULA-yleisradiolähetyksissä (Ultralyhyet aallot) korostetaan suuria taajuuksia RC-piirillä (resistance/capacitance), jolla on $50\mu\text{s}$ aikavakio. Vastaanottimessa on vastaavalla aikavakiolla toimiva korkeiden taajuuksien vaimennuspiiri. Tämä auttaa häivyttämään kohinaa. VHF-alueen (very high frequency) radiopuhelimissa on kohinasalpa (squelch), joka automaattisesti hiljentää kuuntelussa olevan kanavan, mikäli siinä ei esiinny radioliikennettä. Muulloin kohina kuuluisi häiritsevän voimakkaana. [4]

Usein FM-lähetykset ovat stereofonisia. Tällöin on siirrettävä sekä oikeaan (R) että vasempaan (L) kaiuttimeen tulevat signaalit. Kantoaaltoa moduloidaan kantataajuussignaaleilla, jossa on kaksi osaa: 15 kHz:iin ulottuva summasignaali $L + R$ ja tämän yläpuolella 38 kHz:n ympärillä oleva erotussignaali $L - R$. Summasignaalia voidaan kuunnella monovastaanottimella. Stereovastaanottimessa elektroniikkapiirit erottavat demoduloidusta signaalista kanavat erilleen. [2]

FM-signaalin spektri sisältää kantoaallon lisäksi äärettömän määrän sivukaistoja. Tarvittava kaista on leveämpi kuin amplitudimodulaatiossa, mutta häiriöiden ja kohinan sietokyky on parempi. Teoriassa FM-signaalin vaatima taajuuskaista on äärettömä, mutta käytännössä kaistaa voidaan rajoittaa ilman merkittävää vääristymää. [1]

Kuvassa 5 on FM:n graafinen kuvaus. Moduloimattoman kantoaallon (A) jokainen sykli on käyttäen saman verran aikaa. Kun moduloiva signaali (B) lisätään, kantoaallon taajuus kasvaa tai pienenee moduloivan signaalin polariteetin mukaan (C). [3]



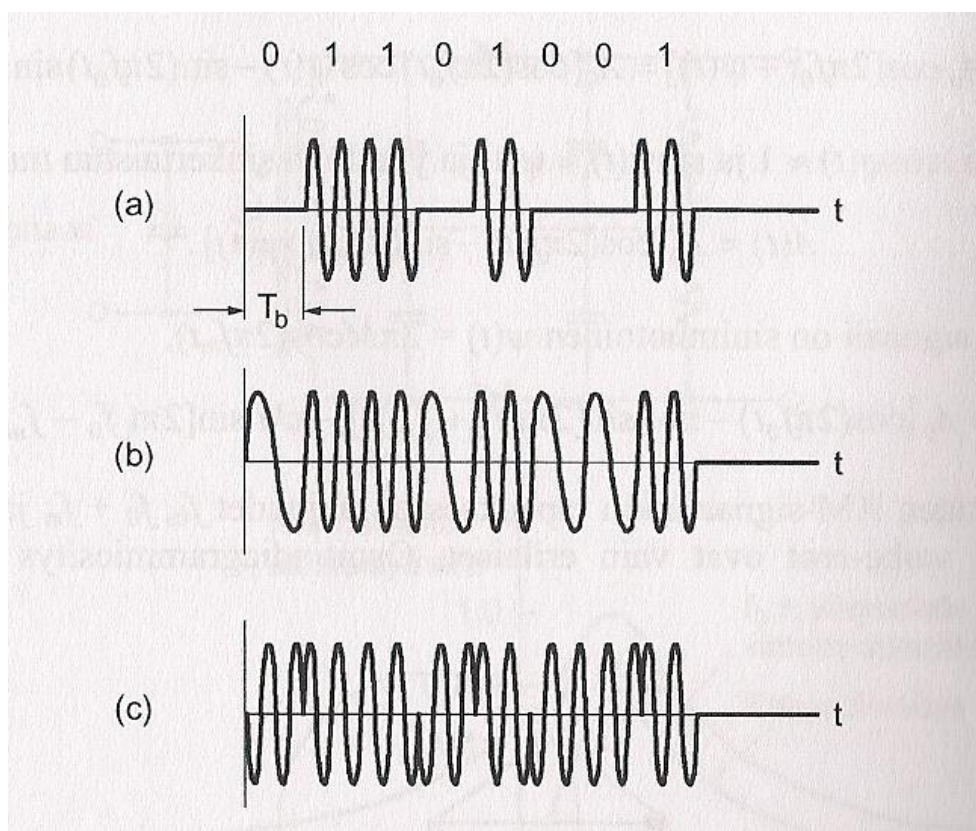
Kuva 5. FM:n graafinen esitys. Skannattu [3, sivu 8.6]

2.3.3 Digitaalinen modulaatio

Analoginen signaali voidaan muuttaa digitaaliseen muotoon ottamalla siitä näytteitä riittävän tiheään. Digitaalinen signaali voi olla kaksitilainen eli binäärinen tai tiloja voi olla useita. Digitaalisen modulaation etuna on erityisesti spektrin kokonaiskäytön tehokkuus. Koska häiriöiden sietokyky on hyvä, taajuuksien uudelleenkäyttö on tehokasta ja aikajakokanavointi on helposti toteutettavissa. [1]

Kuvassa 6 on esitetty ASK- (amplitude-shift keying), FSK- (frequency-shift keying) ja PSK-signaalien (phase-shift keying) aaltomuodot. Lähetettävä symbolijono on 01101001. ASK:ssa kantoaaltoa joko lähetetään tai ei lähetetä. FSK:ssa lähetetyn signaalin taajuus on joko f_1 tai f_2 . PSK:ssa nollaa ja ykköstä vastaavien signaalien välillä on 180 asteen vaihe-ero. Analogisen signaalin erottaminen aaltomuotoja tar-

kastelemalla saattaa olla vaikeaa, mutta PSK:n ja FSK:n erottaa helposti toisistaan.
[1]



Kuva 6. Digitaalinen modulaatio: (a) ASK, (b) FSK, (c) PSK. Skannattu [1, sivu 220]

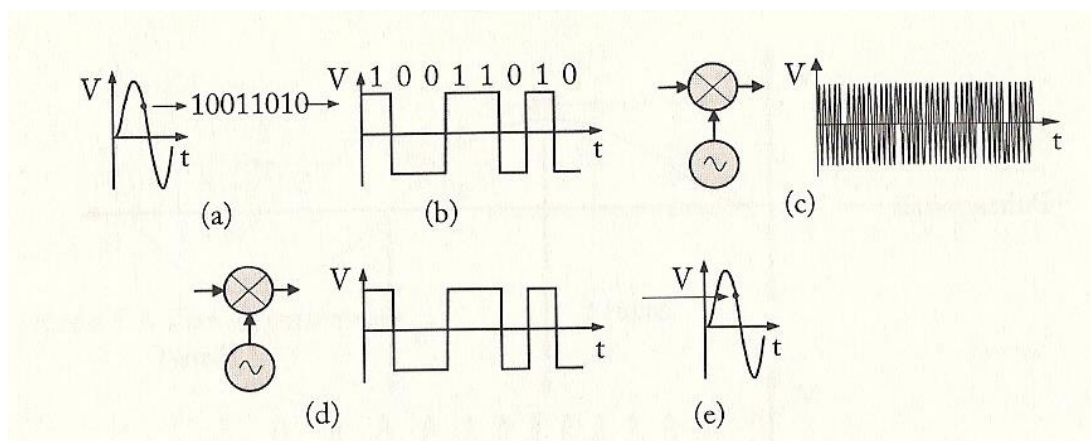
Näytteenottotaajuudella 8000 näytettä sekunnissa puhesignaalista voidaan siirtää taajuuskomponentit 4 kHz:iin asti. Musiikin siirto vaatii leveämmän taajuuskaistan, koska ihminen kuulee taajuuksia 20 kHz:iin saakka. Seuraavaksi analogiselle näyttearvolle pitää määrittää numeerinen arvo, esimerkiksi väliltä 0-255 oleva kokonaisluku. Kymmenjärjestelmän sijaan käytössä on kuitenkin binäärinen kaksijärjestelmä, jossa kymmenjärjestelmän lukuja 0-255 vastaavat luvut ovat 00000000-11111111. Yhtä näytepistettä kuvataan siis kahdeksalla bitillä ja 8000 näytteellä sekunnissa puhesignaalin kuvaamiseen tarvitaan 64 kilobittiä sekunnissa. Puhesignaali muunnetaan digitaalseksi analogi-digitaalimuuntimen eli AD-muuntimen (analog to digital) avulla siten, että symbolia 1 vastaa positiivinen jännite ja symbolia 0 negatiivinen jännite. Tehokkaiden koodausalgoritmien avulla 64 kilobittiä sekunnissa voidaan puristaa noin 10 kilobittiin sekunnissa äänenlaadun juuri heikkenemättä. Bittien määrää voidaan karsia edelleen, mutta puhujan ääni alkaa kuulostaa synteettiseltä. [2]

Kantaaaltoa moduloidaan digitaalisella kantataajuisella signaalilla niin, että symbolin muuttuessa kantaalton vaihekulma muuttuu 180 astetta. Näin syntyvä PSK-signaali muodostuu siniaallon pätkistä ja niiden välillä olevista vaihehyppäyksistä. Vaiheilmaisimessa verrataan moduloitua signaalia vastaanottimessa kehitettyyn tarkasti oikeavaiheiseen kantaaltoon. Kantaalton kanssa samassa vaiheessa oleva signaali tuottaa positiivisen jännitteen, joka muunnetaan symboliksi 1, kun taas vastakkaisvaiheinen signaali tuottaa negatiivisen jännitteen ja siis symbolin 0. Seuraavaksi DA-muunnin (digital to analog) eli digitaal-analogimuunnin käsittelee aina kahdeksan bittiä kerrallaan, muuntaa ne tiettyyn jännitearvoon ja palauttaa alkuperäisen puhesignaalin aaltomuodon. [2]

Ideaalinen modulaatiomenetelmä käyttäisi radiospektriä tehokkaasti sekä sietäisi hyvin häiriötä, kohinaa ja häipyymiä. Tarvittavat piirilohkot olisivat myös edullisia ja kuluttaisivat vähän tehoa. Nämä vaatimukset ovat kuitenkin ristiriitaisia, ja käytännössä tarvitaan kompromisseja. [1]

Binääriset FSK-, ASK-, ja PSK-signaalit voidaan luoda yksinkertaisilla piireillä. Koska FSK- ja ASK-signaalit ja voidaan ilmaista epäkoherentisti verhoikäyräilmaisimella, myös vastaanottimet saadaan halvoiksi ja yksinkertaisiksi. Koherentit FSK- ja ASK-ilmaisimet on monimutkaisempia, mutta niillä voidaan saavuttaa parempi bittivirhesuhde BER (bit error rate). Pienin bittivirhesuhde on saavutettavissa käyttämällä PSK-modulaatiota, mutta PSK-signaalin ilmaiseminen edellyttää oikeavaiheisen kantaalton generointia vastaanottimessa. [1]

Kuva 7 esittää signaalin aaltomuotoja PSK-järjestelmässä: (a) Aluksi näytepiste digitalisoidaan kahdeksaksi bitiksi, (b) bitit muutetaan määrätyiksi jännitteiksi, (c) kantataajuinen signaali sekoitetaan kantaaltoon, (d) vastaanottimessa signaali sekoitetaan takaisin kantataajuudelle ja (e) bitit koodataan jännitteeksi.



Kuva 7. PSK-järjestelmä. Skannattu [2, sivu 134]

2.4 Suodattimet

Suodatin on elektroninen piiri, jonka avulla signaalia saadaan muokattua halutunlaiseksi. Yksi tavallisimpia suodattimia on suodatin, joka valikoi signaalit taajuuden perusteella. Esimerkiksi radiovastaanottimessa halutaan esivahvistimelle vain tietyn-taajuiset signaalit, ja kaiuttimessa suodatetaan korkeat taajuudet diskanttielementille ja matalat taajuudet bassoelementille. [5]

Siirtofunktion tyyppi määrää suodattimen käyttäytymisen. Suodattimet voidaan jao-tella siirtofunktion perusteella alipäästö-, kaistanpäästö-, ylipäästö-, kaistanesto- ja kokopäästösuodattimiin. Siirtofunktion tyypin lisäksi sen asteluku vaikuttaa suodat-timen toimintaan ja sen jyrkkyyteen. Mitä suurempi asteluku on, sitä jyrkempiä siir-tofunktioita on mahdollista toteuttaa. Jyrkkyys tarkoitetaan sitä, kuinka nopeasti suo-dattimen vaste vaimenee päästökaistan ja estokaistan rajalla. [5]

Signaalikäsittelyä voidaan tehdä perinteisesti analogisilla komponenteilla, mutta sa-mat funktiot voidaan toteuttaa numeerisesti tietokoneella. Digitaalinen signaalipro-cessori (digital signal processor, DSP) on tietokone, joka on erikoistunut reaaliaikai-seen signaalikäsittelyyn. Kantataajuudella digitaalinen suodatus on helppoa, mutta signaalinkäsittelyn nopeutumisen myötä digitaalinen suodatus on tullut mahdolliseksi yhä suuremmilla taajuuksilla. Digitaalisen suodatuksen etuna perinteiseen analogi-seen verrattuna on joustavuus, sillä digitaalisen suodattimen taajuusvastetta voidaan muuttaa ohjelmallisesti. [1,10]

Optimaalisessa tapauksessa päästökaistalla ei ole vaimennusta ollenkaan ja estokais-tan vaimennus on ääretön. Ideaalisen suodattimen vaihevaste päästökaistalla on lineaarinen, jolloin useita taajuuskomponentteja sisältävä signaali pysyy vääristymättömänä. Suodattimia käytetään myös eritaajuisten signaalien yhdistämiseen (multipleksointi) tai erottamiseen (demultipleksointi). Oskillaattorien ja vahvistimien virittä-miseen käytetyt piirit, impedanssisovituspiirit, viivelinjat ja hidasaaltorakenteet ovat myös suodatinpiirejä. [1]

Radiovastaanottimissa ja -lähettimissä on yleensä monia eri taajuuksilla toimivia suodattimia. Lähettimen suodattimilla muokataan signaalin spektriä ja estetään muun muassa tehovahvistimissa ja sekoittimissa syntyvien väärin taajuuskomponenttien pääsy antennille saakka. Täten lähetin ei häiritse liikaa muita radioaaltojen käyttäjiä. [1]

Vastaanottimen suodattimet poistavat antennin kautta kytkeytyviä häiriöitä, kohinaa ja monia muita eri radiojärjestelmistä peräisin olevia signaaleja. Nämä signaalit voi-vat olla taajuudeltaan lähellä toivottua signaalia ja sitä huomattavasti voimakkaam-pia. Tällöin signaalia suodatetaan usein sekä suurtaajuudella, välitaajuudella että kan-tataajuudella, koska yhdelle suodattimelle tehtävä olisi liian haastava. [1]

Radiolaitteissa, jotka vastaanottavat ja lähettävät samanaikaisesti yhden antennin kautta, tarvitaan dupleksisuodattimia. Dupleksisuodatin estää voimakkaan lähetys-signaalin pääsyn herkälle vastaanottimelle. Vaikka vastaanotinta ei olekaan suunni-teltu toimimaan lähetystaajuudella, lähettimen teho olisi sille liikaa. [1]

2.5 Kohina

Kohina häiritsee radioyhteyksiä. Vastaanotossa heikko hyötysignaali saattaa jäädä antennin vastaanottaman ja vastaanottimessa syntyneen kohinan peittoon. Signaalite-hon ja kohinatehon suuruuksien suhde vaikuttaa usein ratkaisevasti radioyhteyden laatuun. Hyötysignaalikin voi tosin olla kohinaa, kuten esimerkiksi radioastronomi-assa tai kaukokartoituksessa. [1]

Jokaisessa resistanssissa esiintyy lämmön vaikutuksesta vapaiden elektronien satunnaista liikettä. Liikkuva sähkövaraus puolestaan merkitsee sähköisen vaihtojännitteen esiintymistä resistanssin navoissa. Tämän niin sanotun lämpökohinan spektri on tasainen, eli kaikkia taajuuksia esiintyy kohinassa yhtä paljon. Voidaan puhua myös valkoisesta kohinasta. [4]

Analoginen radiovastaanotin toistaa kohinaa, kun se viritetään kanavien väliselle taajuudelle. Kohinaa ei ole kanavien välissä sen enemmän kuin kanavien kohdallakaan, mutta kantoaallon puuttuessa vastaanottimen vahvistuksensäätö nostaa sen kuuluviin. Analogisessa televisiossa kohina näkyy esimerkiksi ohjelmälähetyksen puuttuessa. Vastaanotinten toistama kohina johtuu pääasiassa laitteissa itsessään syntyvästä kohinasta, mutta jossain määrin myös luonnon taustakohinasta, kuten kosmisesta taustasäteilystä, lämpimien pintojen emittoimasta sähkömagneettisesta säteilystä ja auringossa tapahtuvista purkauksista. [5]

Kohinaa ei voi eliminoida laitteen rakentamiseen käytettävien komponenttien valinnalla. Kaikki resistiiviset eli häviölliset komponentit synnyttävät kohinaa normaalissa käyttölämpötilassa. Elektronit törmäävät aineen kidehilaan sitä useammin, mitä lämpimämpää aine on. Törmäys johdosta elektronin liiketila muuttuu, jolloin syntyy säteilyä. Törmäykset aiheuttavat myös resistiivisyyden, joten lämpökohinaa syntyy kaikissa tehoa absorboivissa piireissä. Lämpökohina on taajuudesta riippumaton eli valkoista kohinaa. Lämpökohinaa voidaan vähentää merkittävästi viilentämällä komponentit mahdollisimman lähelle absoluuttista nollapistettä ($-273,15\text{ °C}$) ja eliminomalla kaikki rakenteessa syntyvät häviöt. [1,5]

Kohinamekanismeja on myös muita, esimerkiksi rae- $1/f$ - ja kvanttikohina. Raekohina voidaan pitää puolijohdelaitteiden ja elektroniputkien merkittävimpana kohinamekanismina. Raekohina johtuu varauksen rakeisuudesta (elektronin varaus on alkeisvaraus). Esimerkiksi Schottky-liitoksessa metallin ja puolijohteen rajapinnan yli kulkeva virta muodostuu elektronin varauksen suuruisista impulsseista, jotka ilmenevät kohinana. Raekohinan määrä on suoraan verrannollinen virtaan. [1]

Matalilla taajuuksilla taas puolijohdekomponenteissa esiintyy $1/f$ -kohinaa, jonka suuruus on karkeasti ottaen kääntäen verrannollinen taajuuteen. Tätä kohinaa aiheuttaa muun muassa johtavuusvyön elektronien määrän vaihtelu. [1]

Radioaallon energian kvantittuminen synnyttää kvanttikohinaa. Se on merkittävää alimillimetri- ja infrapuna-aalloilla, joilla säteilyn kvantin energia on suuri. Laitteen kohinaisuutta kuvaa kohinalämpötila T_e tai sisäänmenoon redusoitu kohinakerroin F . Kohinakerroin kertoo kuinka moninkertainen on laitteen ulostulokohinateho verrattuna vastaavan kohinattoman laitteen ulostulokohinatehoon, kun molempien sisäänmenossa on kohinalähteenä lämpötilassa $T_0 = 290\text{K}$ oleva resistiivinen sovitettu pääte. Kohinakerroin kuvaa siis sitä, miten paljon S/N heikkenee laitteessa, kun sisäänmenon pääteen lämpötila on 290K . [1]

Laitteen kohinalämpötila T_e taas kertoo missä lämpötilassa vastaavan kohinattoman laitteen sisäänmenoon kytketyn resistiivisen sovitetun pääteen tulisi olla, jotta ulostulon kohinayltöteho olisi sama kuin laitteen itsensä synnyttämä kohinayltöteho ulostulossa. T_e on tulkittavissa myös siten, että laitteessa syntyvä kohina kuvitellaan siirtyneeksi sisäänmenon pääteen lämpökohinaksi. [1]

Avaruus on täynnä kohinaa. Antenni ei vastaanotata erota onko signaali kohinaa vai hyötysignaalia. Antennin suuntaa vaihdeltaessa siihen saapuva kohinateho vaihtelee. [4]

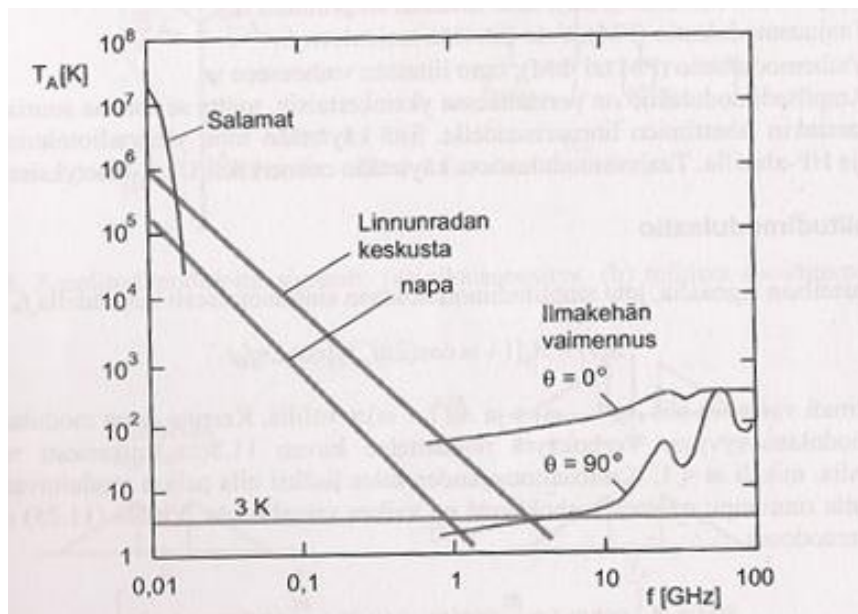
Ionosfääriä läpäisemättömillä taajuuksilla, eli HF-alueella (high frequency) ja sitä matalammilla taajuuksilla suurimpia kohinan lähteitä ovat salamaniskut. Kohinan voimakkuus riippuu paikasta, taajuudesta ja vuoden- ja vuorokaudenajasta. [1]

Taajuusalueella 20MHz - 1GHz Avaruudesta tuleva kohina on hallitsevaa. Linnunradassa syntyy radiotaajuuksilla kohinatehoa, joka on voimakkaimmillaan Linnunradan tasossa ja pienenee siitä loitotessa. Linnunradan kohina on myös kääntäen verrannollista taajuuden suhteen. Kaikilla taajuuksilla esiintyy 3 kelvinin taustasäteily, jonka lähteen oletetaan olevan maailmankaikkeuden alkuräjähdyks. [1]

Avaruudesta tuleva kohina jaetaan kahteen luokkaan. Termistä alkuperää olevaan kohinaan ja ei-termistä alkuperää olevaan kohinaan. Useat taivaankappaleet ovat fyysikaalisesti mustia kappaleita ja säteilevät radioaaltoja mustan kappaleen säteilylain mukaan. Lämpökohinan perusteella voidaankin mitata esimerkiksi planeettojen ja niiden kuiden pintalämpötiloja radioteleskoopin avulla. [4]

Linnunradan ja tiettyjen radiogalakseen kohinalämpötila voi olla miljoonia kelvineitä tietyissä tilanteissa, vaikka kohteen pintalämpötila on paljon alempi. Kyseessä on tällöin ei-termistä alkuperää oleva kohina. Tällaista syntyy esimerkiksi elektronisuihkun osuessa magneettikenttään suurella nopeudella. Törmäys synnyttää radiotaajuista synkrotronisäteilyä. Tällainen säteily on polarisoitunutta, kun taas termistä alkuperää olevan kohinan polarisaatiosuunta on täysin satunnainen. [4]

Yli 1 GHz:n taajuuksilla ilmakehän vaimennuksen aiheuttama lämpökohina on suurin kohinalähde. Kohinan määrä riippuu ilmakehän kosteudesta ja elevaatiokulmasta. Ilmakehä voidaan ajatella vaimentimena, jonka fysikaalinen lämpötila on noin 270 K. Ihmisten toiminnan aiheuttama kohina voi olla merkittävää asutusalueiden lähellä. VHF-alueella ja sitä matalammilla taajuuksilla voimajohtojen ja autojen sytytystulppien aiheuttama kohina voi olla luonnon aiheuttamaa kohinaa voimakkaampaa. Kuvassa 8 on kuvattuna luonnon aikaansaamia kohinalämpötiloja taajuuden funktiona. [1]



Kuva 8. Luonnon aikaansaamia kohinalämpötiloja taajuuden funktiona. Skannattu [1, sivu 211]

Informaatioteoriassa pätee yleisesti seuraava sääntö. Mitä suuremmalla nopeudella informaatiota halutaan siirtää, sitä suurempi on tarvittava taajuuskaista. Kohina vaikuttaa asiaan siten, että signaalin ollessa heikko (esimerkiksi geosynkronisista satelliiteista tulevat TV-lähteet) (television) tarvitaan samaan siirtonopeuteen suurempi taajuuskaista kuin maanpäällisissä lähteissä. Mitä parempaa signaalikohinasuhdetta käyttäen hyötysignaali voidaan siirtää, sitä kapeammalla taajuuskaista riittää. [4]

2.6 Radiovastaanottimet

Radiovastaanottimen tehtävä on poimia antennilta tulevasta suurtaajuusspektristä haluttu taajuus ja vahvistaa signaalia. Tämän jälkeen radiovastaanotin muodostaa alkuperäistä moduloivaa signaalia vastaavan signaalin Radiovastaanottimelta vaadittavia ominaisuuksia ovat muun muassa riittävä herkkyys, riittävä valintatarkkuus, riittävä harhatoistojen vaimennus ja riittävä dynamiikka. Dynamiikalla tarkoitetaan kykyä käsitellä laajalla tasoalueella vaihtelevia signaaleja. Näistä ominaisuuksista herkkyys on helppo toteuttaa kun taas vaikeimpana voidaan pitää riittävää dynamiikkaa. [4]

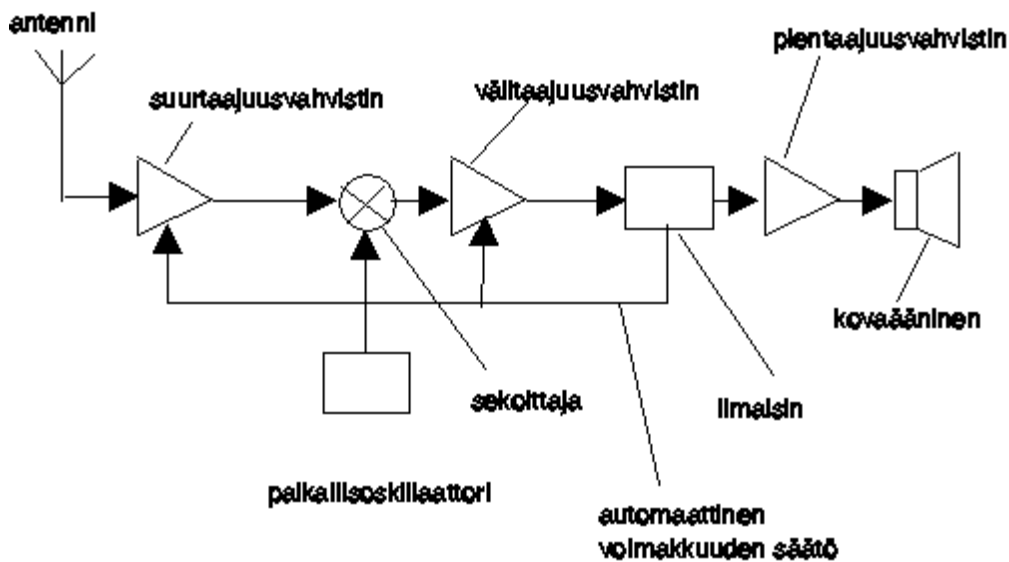
Vastaanottimen oma kohina on herkkyyttä rajoittava tekijä. Herkkyyslukemalla on merkitystä vain, jos samalla ilmoitetaan vastaava S/N-suhde ja taajuuskaistan leveys. Herkkyyttä tärkeämpi suure on vastaanottimen oma kohinalämpötila tai sen S/N-suhde. [4]

Vastaanottimen selektiivisyys ilmaistaan läpäisykaistan leveydellä (kHz). Selektiivisyysluvulla on merkitystä vain jos samalla ilmoitetaan läpäisykaistan ulkopuolisten signaalien vaimennus (dB). Vaadittu kaistanleveys riippuu vastaanotettavan lähteen tyypistä. Kantoaaltoa katkomalla luotava sähkötyssignaali vaatii vain 500Hz kaistanleveyden. SSB-puhesignaali taas tarvitsee noin 3,5kHz leveän kaistan, AM-puhesignaali noin 9kHz kaistanleveyden ja ULA-yleisradiolähete vie kaistaa jo 150kHz. Kapealla kaistalla lähitaajuuksilla sijaitsevat häiriölähteet vaimenevat paremmin, mutta äänenlaatu kärsii. [4]

Dynamiikka tarkoittaa sitä signaalitasoaluetta, jonka vastaanotin pystyy toistamaan. Tämä ilmaistaan desibeleinä. Nykyaikaisen vastaanottimen dynamiikka on yli 100

dB. Vahvistus säädetään antennista tulevan signaalin tason mukaiseksi vastaanottimissa vakiona olevan automaattisen tasonsäädön avulla. Huonon dynamiikan aiheuttamia harhasignaaleja tasonsäätö ei kuitenkaan poista. Kuunneltavan aseman ollessa heikko ja kun aivan lähitaajuudella on huomattavan vahva lähete, syntyy huonon dynamiikan omaavassa vastaanottimessa harhatoistoja. Tätä kutsutaan ristimodulaatioilmiöksi. Nämä harhatoistot käytännössä estävät heikon aseman kuuntelun. Riittävä dynamiikka onkin ehkä vastaanotinsuunnittelun vaikeimmin toteutettava ominaisuus. [4]

Radiotoiminnan alussa käytössä oli niin sanottuja suoria vastaanottimia. Niissä antennilta tuleva signaali valittiin rinnakkaisresonanssipiirin avulla taajuusspektristä, vahvistettiin suurtaajuusvahvistimessa, ilmaistiin ja vahvistettiin kaitutinta varten pientaajuusvahvistimessa. Suorien vastaanottimien syrjäytymiseen ovat johtaneet niiden heikko dynamiikka ja selektiivisyys. Nykyaikaista vastaanotinta kutsutaan supervastaanottimeksi. Kuvassa 9 on supervastaanottimen rakenne lohkokaaviomuodossa. [4]



Kuva 9. Supervastaanottimen lohkokaavio. [4]

Nykyaikaiset massatuotantoon soveltuvat radiolaitteet ovat hyvin pitkälle integroituja. Tällaisia ovat muun muassa kännykkä ja navigointivastaanotin. Signaalien käsittelyyn tarvittavat monet erilliset piirilohkot ja komponentit on pyritty korvaamaan muutamilla pienillä puolijohdesiruilla. Silti esimerkiksi suodattimien integrointi puolijohteelle ei vielä onnistu riittävän hyvin. Täydellinen Integrointi tarkoittaisi radion

koko elektroniikan saamista yhdelle sirulle. Integrointi on lisännyt radiolaitteiden monimutkaisuutta ja monipuolisuutta, mutta niiden kokoa ja tehon kulutusta on saatu pienennettyä. Integrointi on mahdollistanut radiotekniikkaan liittymättömien toimintojen lisäämisen radioon. Tämä näkyy hyvin esimerkiksi matkapuhelimissa. [2]

Viime vuosina digitaalisen signaalinkäsittelyn nopeutta on saatu kasvatettua hurjasti ja trendi tulee todennäköisesti jatkumaan. DSP (digital signal processing) onkin nykyaikaisen radion olennainen osa. Aiemmin analogisten piirien hoitamia tehtäviä siirtyy yhä enemmän digitaalisille piireille. Yksinkertaisen AD- tai DA-muunnoksen lisäksi radiossa voidaan digitaalisesti myös muun muassa pakata kuvia tai puhetta pieneen bittimäärään signaalien ennustettavuuden sekä korvan ja silmän fysiologisten rajoitusten johdosta. Myös lähetettävän tiedon salaaminen, signaalin suodatus ja demodulointi onnistuu digitaalisesti. Lisäksi matkan varrella syntyneitä bittivirheitä pystytään korjaamaan virheenkorjausalgoritmien avulla. [2]

Vielä pitkälle tulevaisuuteenkin radio tullee sisältämään samoja signaalinkäsittelyn peruskomponentteja kuin nykypäivän matkapuhelin tai FM-radio. Näitä ovat muun muassa antennit, mikropiireille integroidut transistorit, akustiset suodattimet, vastukset, diodit, kelat ja kondensaattorit sekä DSP-piirit. [2]

3 GNU RADIO

Ohjelmistoradiolla tarkoitetaan lähetin-vastaanotinjärjestelmää, jossa perinteisesti fyysisillä komponenteilla (sekoittimet, suodattimet, vahvistimet, modulaattorit, demodulaattorit, ilmaisimet) toteutetut toiminnallisuudet tai osa niistä toteutetaan ohjelmallisesti tietokoneessa tai sulautetussa järjestelmässä. Ohjelmistoradion etuna on sen joustavuus, eli radion toimintaa voidaan muokata käyttäjän tarpeiden mukaan. Ohjelmistoradiolla voidaan myös käyttää hyväksi erilaisten radioverkkojen palveluja yhdellä radiolaitteella. Uusien palveluiden ja kokonaisten radiojärjestelmien käyttöönotto onnistuu myös ilman laitteistomuutoksia. Tässä työssä keskitytään ohjelmistoradioon nimeltä GNU Radio. [5,6]

GNU Radio on ilmainen ja avoimen lähdekoodin ohjelmistojen kehittämisen työkalupakki, joka tarjoaa signaalinkäsittelylohkot ohjelmistoradioiden toteutukseen. Sitä voidaan käyttää helposti saatavilla olevien, edullisten ulkoisen RF-laitteistojen kanssa ohjelmistoradion luomiseen, tai ilman laitteistoa simulointi-tyylisessä ympäristössä. GNU Radiota käytetään laajalti harrastelijoiden keskuudessa ja akateemisissa ja kaupallisissa ympäristöissä tukemassa sekä langattoman viestinnän tutkimusta, että reaaliaikaisen radiojärjestelmässä.

3.1 Työympäristön asennus

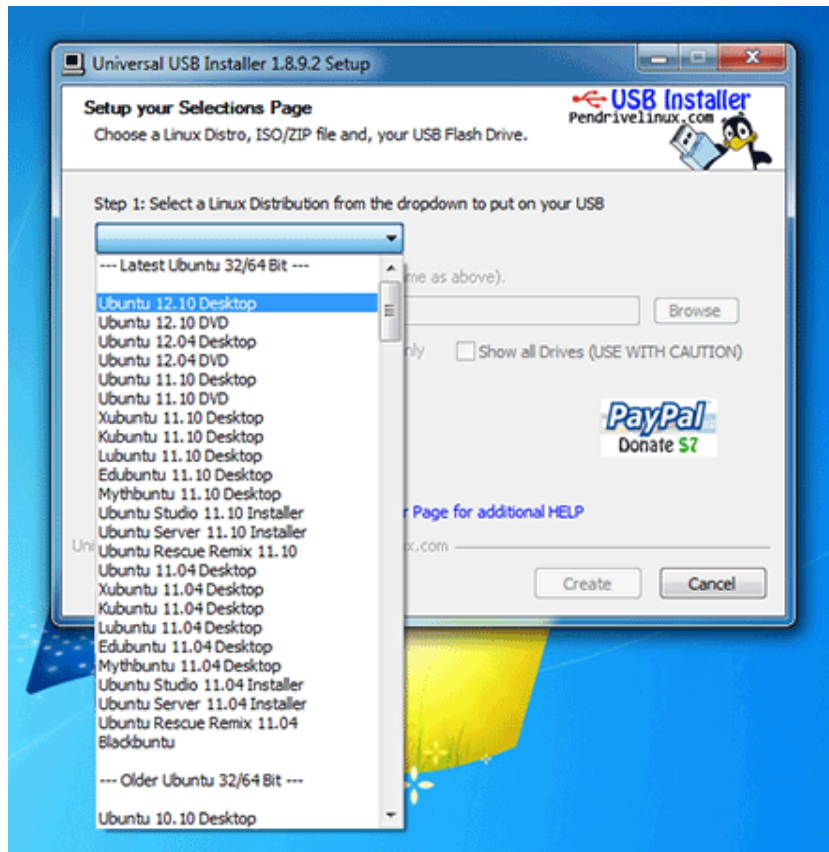
Ennen kuin itse GNU Radiota päästään testaamaan tai edes asentamaan on valittava ympäristö, jossa ohjelmaa tullaan käyttämään. Lähinnä kyseeseen tulee käyttöjärjestelmän valinta. Helpoin vaihtoehto monille harrastelijoille olisi luultavasti jokin Microsoftin Windows-käyttöjärjestelmästä, mutta koska GNU Radio on suunniteltu linux-ympäristöön, on suositeltavaa valita se. Näin vältetään ainakin useimmilta yhteensopivuusongelmilta. Tuettuna on sekä Debian, että Ubuntu, joista itse päädyin jälkimmäiseen.

Ubuntusta on olemassa useita eri versioita, mutta kannattaa varmistaa, että mahdollinen laitteisto tukee sitä ja päinvastoin. Käytössäni oli Ettus Researchin USRP (Universal Software Radio Peripheral) N210-radiolaite. Tämä tukee kirjoitushetkellä Ubuntun versioita 12.04–12.10. Päädyin asentamaan Ubuntu 12.10:n.

Asennuksen voi suorittaa joko windows-asennusohjelmalla tai tekemällä erillisen asennusmedian (DVD tai usb-tikku). Windows-installer tukee vain 32-bittisiä tietokoneita, joten omassa tapauksessani se täytyi sulkea heti pois vaihtoehdoista.

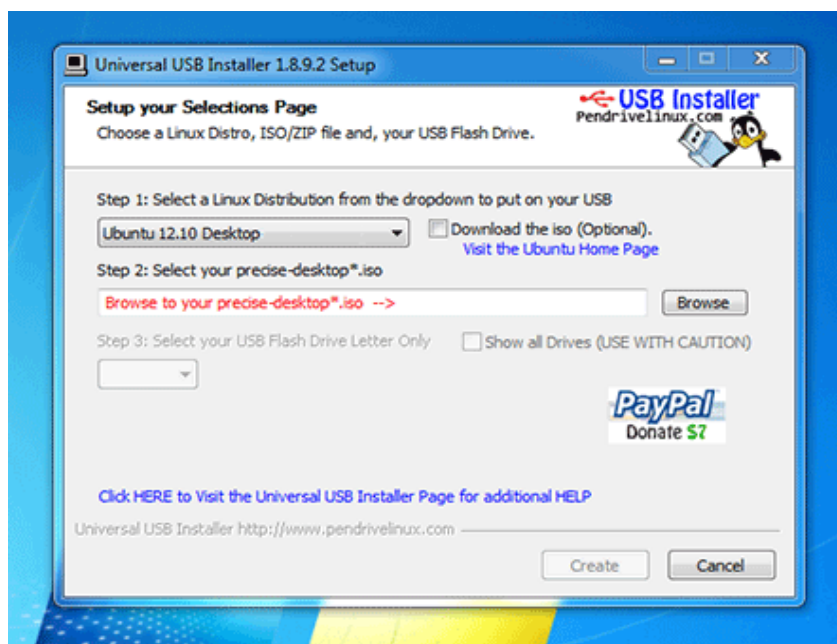
Aluksi ladataan asennuspaketti, joka on ISO-tiedosto (ubuntu-12.10-desktop-amd64.iso). Tiedosto löytyy esimerkiksi Ubuntun www-sivuilta: <http://releases.ubuntu.com/12.10/>. Samasta osoitteesta löytyy myös vaihtoehto torrent-lataamiselle, mikäli palvelin on syystä tai toisesta ruuhkautunut (ubuntu-12.10-desktop-amd64+mac.iso.torrent).

Latauksen valmistuessa voidaan jo valmistella asennusmediaa. Helpointa on käyttää muistitikkoa. [Http://www.pendrivelinux.com/universal-usb-installer-easy-as-1-2-3/](http://www.pendrivelinux.com/universal-usb-installer-easy-as-1-2-3/) osoitteesta saa ladattua asennusohjelman <http://www.pendrivelinux.com/downloads/Universal-USB-Installer/Universal-USB-Installer-1.9.3.9.exe>, joka tekee muistitikusta boottaavan. Ohjelman käynnistyttyä valitaan pudotusvalikosta asennettava käyttöjärjestelmä. Ohessa kuvassa 10 on Ubuntun verkkosivuilta kopioitu kuva näkymästä:

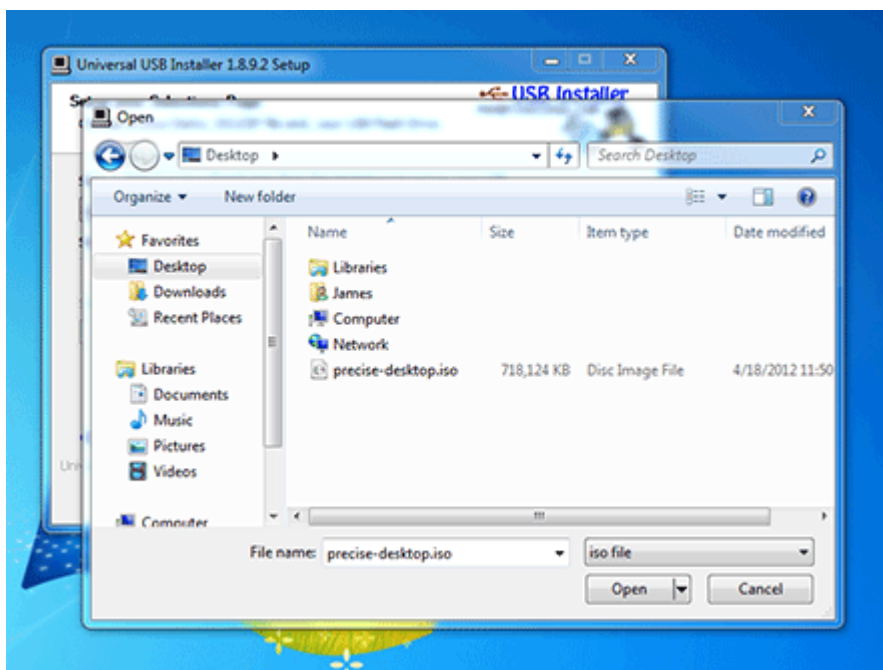


Kuva 10. <http://assets.ubuntu.com/sites/ubuntu/528/u/img/download/create-usb-windows-1-12.10.png>

Valitaan ”Browse”-napista juuri ladattu ISO-tiedosto kuvien 11 ja 12 mukaisesti:

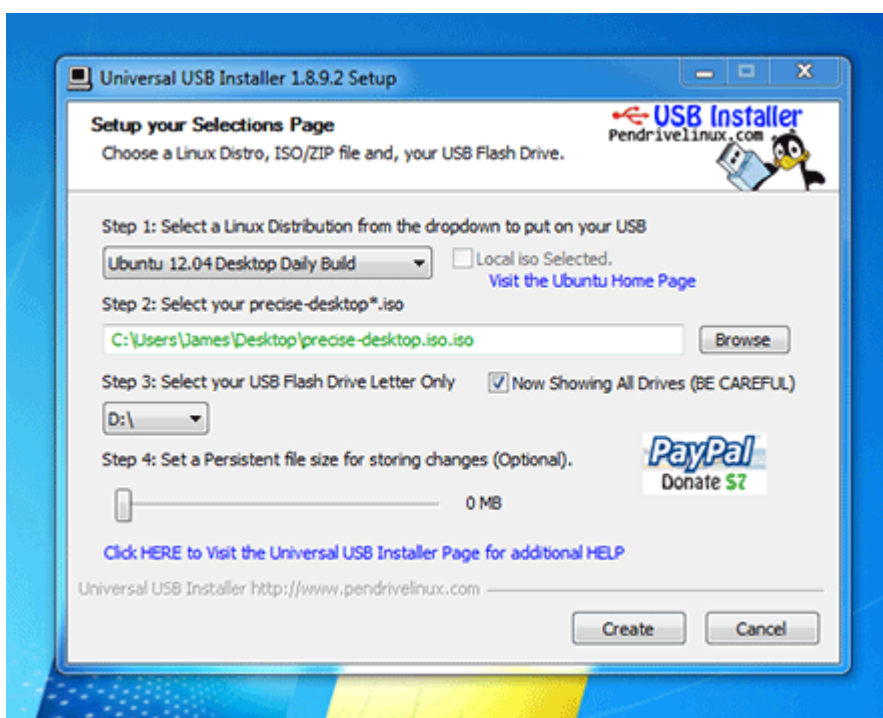


Kuva 11. <http://assets.ubuntu.com/sites/ubuntu/528/u/img/download/create-usb-windows-2-12.10.png>



Kuva 12. <http://assets.ubuntu.com/sites/ubuntu/528/u/img/download/create-usb-windows-3.png>

Valitaan muistitikun asemapolku kuvan 13 mukaisesti ja painetaan ”Create”:



Kuva 13. <http://assets.ubuntu.com/sites/ubuntu/528/u/img/download/create-usb-windows-4.png>

Tämän jälkeen voidaan käynnistää tietokone uudelleen ja aloittaa Ubuntun asennus. Kannattaa varmistaa, että muistitikku on valittuna käynnistysvaihtoehdoksi BIOS:sta. (Basic Input-Output System)

Itse asennus on erittäin yksinkertaista. Käyttäjän vastuulle jää lähinnä käyttäjänimen ja salasanan valinta.

3.2 Ohjelmiston asennus

Nyt kun käyttöjärjestelmä pyörii toivon mukaan sujuvasti, päästään asentamaan itse GNU Radiota ja tarvittavia kirjastoja. Laitevalmistajan ja GNU Radio-projektin omilta verkkosivuilta löytyvät tarvittavat komennot. Itse asensin ensin UHD-ajurit laitevalmistajan eli Ettus Researchin ohjeiden mukaan. Osoitteesta code.ettus.com/redmine/ettus/projects/uhd/wiki/UHD_Linux voidaan valita halutaanko käyttöön kaikki viimeisimmät toiminnot (unstable) vai varmasti vakaan version (stable). Käytännön harjoitteet eivät käsittele kovin monimutkaisia tilanteita, joten vakaa versio on helppo valinta. Valinta on tehtävä ennen komentojen syöttämistä, sillä näiden kahden version arkistot häiritsevät toisiaan. Voidaan siis avata ubuntun komentojen syöttämistä varten uusi terminal näppäinyhdistelmällä Ctrl+Alt+T ja syötetään seuraavat komennot:

```
sudo bash -c 'echo "deb
http://files.ettus.com/binaries/uhd_stable/repo/uhd/ubuntu/`lsb_release
-cs` `lsb_release -cs` main" > /etc/apt/sources.list.d/ettus.list'

sudo apt-get update

sudo apt-get install -t `lsb_release -cs` uhd
```

Tässä vaiheessa tarvitaan pääkäyttäjän salasanaa.

Seuraavaksi asennetaan itse GNU radio käyttäen esimerkiksi build-gnuradio scriptiä. Siirrytään ensin kansioon, johon tiedostot halutaan ladata.

```
cd Downloads/
```

Jonka jälkeen syötetään komento:

```
sudo wget http://www.sbrac.org/files/build-gnuradio && chmod
a+x ./build-gnuradio && ./build-gnuradio
```

Tätä komentoa jouduin hieman muokkaamaan ennen kuin sain sen ajettua läpi. Liitän seuraavaksi oman syötteeni. Lihavoidussa kohdassa chmod-komento ei mennyt ilman Superuser-oikeuksia sellaisenaan läpi, joten komennon jälkimmäiset osat ajoin uudestaan:

```
jukka@jukka-LIFEBOOK-T900:~/Downloads$ sudo wget
http://www.sbrac.org/files/build-gnuradio && chmod a+x ./build-
gnuradio && ./build-gnuradio

--2013-07-19 01:03:26--  http://www.sbrac.org/files/build-
gnuradio

Resolving www.sbrac.org (www.sbrac.org)... 67.212.80.242

Connecting to www.sbrac.org
(www.sbrac.org)|67.212.80.242|:80... connected.

HTTP request sent, awaiting response... 200 OK

Length: 35224 (34K) [text/plain]

Saving to: `build-gnuradio.2'

100%[=====>] 35,224
104K/s   in 0.3s

2013-07-19 01:03:27 (104 KB/s) - `build-gnuradio.2' saved
[35224/35224]

chmod: changing permissions of `./build-
gnuradio': Operation not permitted

jukka@jukka-LIFEBOOK-T900:~/Downloads$ sudo
chmod a+x ./build-gnuradiojukka@jukka-
LIFEBOOK-T900:~/Downloads$ sudo chmod a+x
./build-gnuradio && ./build-gnuradio

This script will install Gnu Radio from current GIT sources

You will require Internet access from the computer on which
this
```

script runs. You will also require SUDO access. You will require

approximately 500MB of free disk space to perform the build.

This script will, as a side-effect, remove any existing Gnu Radio

installation that was installed from your Linux distribution packages.

It must do this to prevent problems due to interference between a linux-distribution-installed Gnu Radio/UHD and one installed from GIT source.

The whole process may take up to two hours to complete, depending on the

capabilities of your system.

!!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!

NOTE: if you run into problems while running this script, you can re-run it with

the --verbose option to produce lots of diagnostic output to help debug problems.

This script has been written to anticipate some of the more common problems one might

encounter building ANY large, complex software package. But it is not perfect, and

there are certainly some situations it could encounter that it cannot deal with

gracefully. Altering the system configuration from something reasonably standard,

removing parts of the filesystem, moving system libraries around arbitrarily, etc,

it likely cannot cope with. It is just a script. It isn't intuitive or artificially

intelligent. It tries to make life a little easier for you, but at the end of the day

if it runs into trouble, a certain amount of knowledge on your part about

```

system configuration and idiosyncrasies will inevitably be necessary.

Proceed?y

Starting all functions at: Fri Jul 19 01:04:35 EEST 2013

SUDO privileges are required

Do you have SUDO privileges?y

Continuing with script

Installing prerequisites.

====> THIS MAY TAKE QUITE SOME TIME <=====

```

Vaihtoehtoinen ja ehkä helpompi tapa GNU radion asennukseen on käyttää valmiiksi rakennettuja kirjastoja komennolla:

```
sudo apt-get install gnuradio
```

Tällä asennustavalla kannattaa jälkikäteen varmistaa, että asennettu versionumero vastaa tai on edes lähellä viimeisintä GNU Radio-julkaisua. Nämä ja ohjeet muihin vaihtoehtoisii asennustapoihin löytyy seuraavasta osoitteesta:

<http://gnuradio.org/redmine/projects/gnuradio/wiki/InstallingGR>

3.3 GNU Radion käyttö

Nyt ympäristön pitäisi olla valmis, mikäli virheitä ei ilmaantunut.

Nyt voitaisiin yrittää saada yhteyttä USRP-laitteeseen. Mikäli fyysistä radiolaitetta ei ole saatavilla voidaan tämä kohta ohittaa ja käyttää GNU Radiota ilman varsinaista radioliikennettä. Ominaisuuksista saa kyllä hyvän käsityksen ja valmiiksi tallennettuja näytteitä voidaan analysoida ilman. Jos fyysinen laite kuitenkin löytyy, täytyy tietokoneen ethernet porttiin ensin määritellä kiinteä ip-osoite (internet protocol) kommunikaation mahdollistamiseksi. Laitteen ip-osoite on oletuksena 192.168.10.2,

joten suositeltava osoite voisi olla 192.168.10.1 subnet maskilla 255.255.255.0. Linux-ympäristössä tämä onnistuu komennolla:

```
sudo ifconfig <interface> 192.168.10.1
```

<interface> tulee vaihtaa tietokoneen ethernet porttia vastaavaksi. Tietokoneen portit ja niiden lyhenteet näkyvät komennolla:

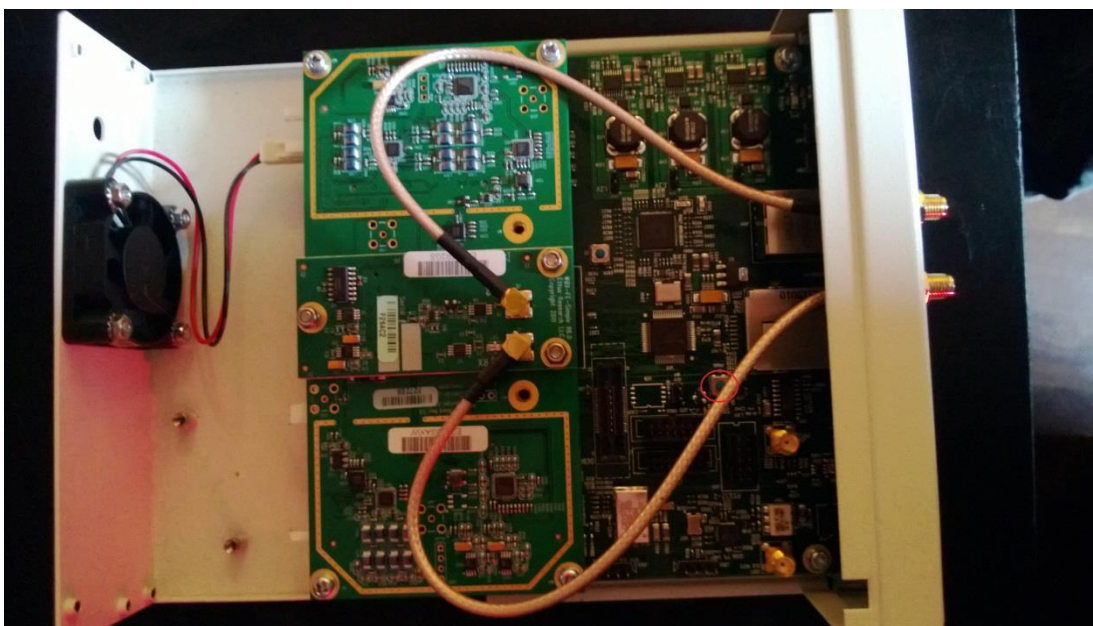
```
ifconfig -a
```

Omassa tapauksessani portti on eth0.

Kun portti on määritelty oikein, voidaan yrittää etsiä tietokoneelle näkyviä UHD-laitteita komennolla:

```
uhd_find_devices
```

Mikäli kaikki on kunnossa, pitäisi laitteen näkyä tässä. Mikäli ip-osoite ei olekaan oletusosoite, pitää laite ensin resetoida. Tämä onnistuu poistamalla laitteen metallikuori ja pitämällä pohjassa oheisessa kuvassa 14 punaisella ympyröityä nappia laitteen käynnistystyksen yhteydessä. Kun etupaneelin valot eivät enää vilku, on toimenpide valmis.

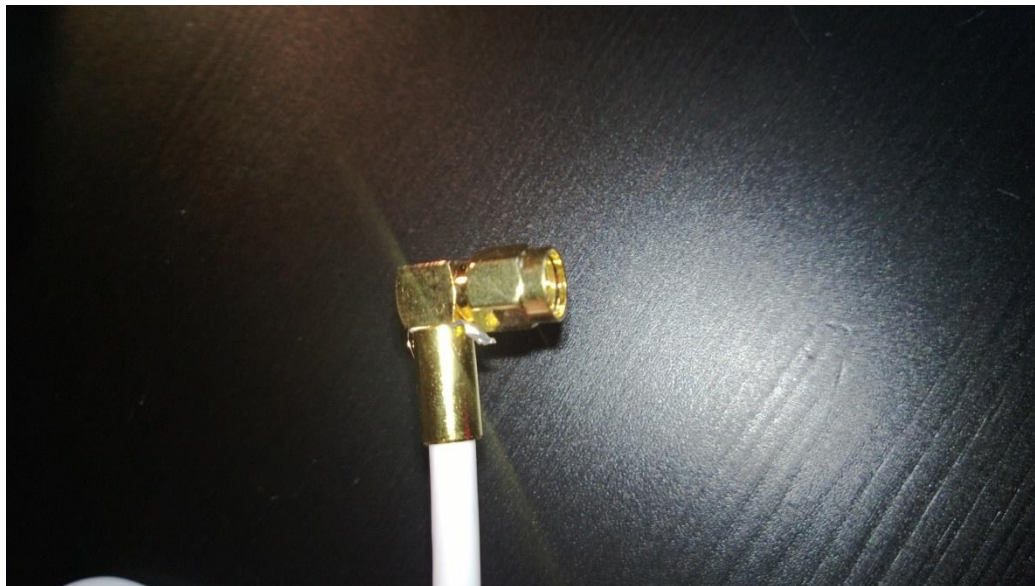


Kuva 14. Reset-nappi ympyröitynä.

Itse en vielä tässäkään vaiheessa saanut yhteyttä USRP-laitteeseen, sillä käytössäni oli vääränlainen verkkokaapeli, jossa kaikki parit eivät olleet kytkettyinä. Sopivan kaapelin löydettyäni myös yhteysongelma poistui. Vaikka yhteys tässä kohtaa näyttäisi toimivan, ei se vielä tarkoita että GNU Radio pystyisi laitetta ongelmitta käyttämään. Riippuen ympäristöstä, jossa USRP-laitetta on viimeksi käytetty, saatetaan vielä joutua vaihtamaan laitteen firmware. Tätä varten asennuspakettien mukana tulee tähän tarkoitettu erillinen työkalu vaihtoehtoisine firmware-tiedostoineen. Työkalu löytyy asennuspolun alta polusta /uhd/host/utills. ajettua työkalun saa komennolla:

```
python usrp_n2xx_net_burner_gui.py
```

Viimeistään nyt pitäisi yhteyden toimia niin kuin pitääkin ja tarvitaan enää antenni, ennen kuin päästään käytännön testeihin. Antennin voi joko ostaa tai rakentaa itse, mutta taajuusalueen tulee sopia tutkittavaan alueeseen. Itse tutkiskelin internetin tarjontaa valmiista antenneista, mutta päädyin lopulta talonyhtiön omaan antenniin. Ostin vain koaksiaalikaapelin ja vaihdoin toiseen päähän USRP-laitteeseen yhteensopivan liittimen. Kuvassa 15 ja 16 näkyy tämä liitin.



Kuva 15. Koaksiaalikaapelin liitin.



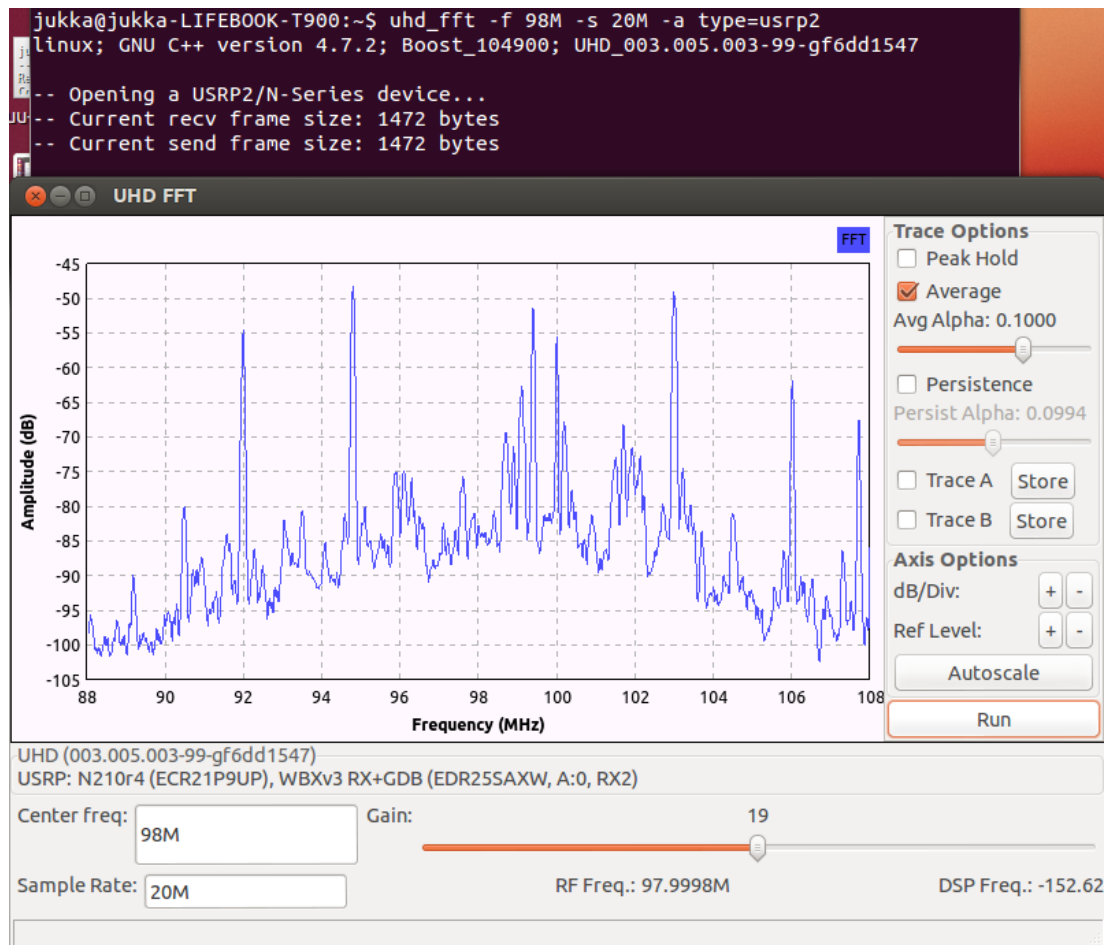
Kuva 16. Koaksiaalikaapelin liitin USRP-laitteeseen kytkettynä.

Tämä päätös tosin sulki pois mahdollisuuden testata käytännössä radiolähetyksiä, sillä talon antenniverkko on suunniteltu vain yhdensuuntaiseen liikenteeseen. En halunnut riskeerata omien tai naapurien antenniverkkoon liitettyjen laitteiden rikkoutumista.

Nyt kun ympäristö on kunnossa, voidaan aloittaa testit ja yrittää saada FM-radiospektri näkyviin. Kerralla on mahdollista saada näkyviin vain 20Mhz kaista. Keskitaajuus 98Mhz vaikuttaisi hyvältä, jolloin ruudulle saadaan FM-spektri 10Mhz keskitaajuuden molemmin puolin. Seuraava komento ei yhden laitteen kokoonpanolla vaadi muita arvoja, joten viimeinen parametri, jossa määritellään käytettävä laite, on turha.

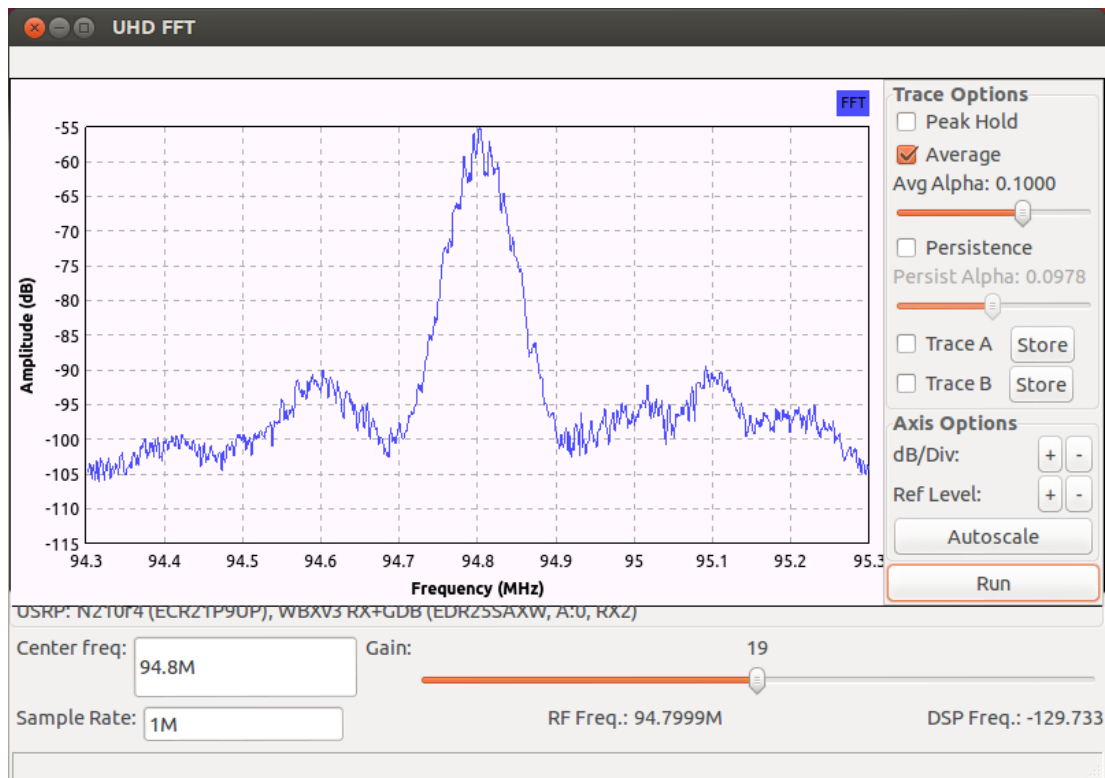
```
uhd_fft -f 98M -s 20M -a type=usrp2
```


Tällöin saadaan kuvan 17 näkymä:



Kuva 17. FM-radiospektri.

Kuvassa nähdään välillä 88MHz-108MHz vaikuttavat FM-radioasemat terävinä piikkeinä. Mitä korkeampi piikki, sitä vahvempi on aseman signaali. Vaihtamalla Center freq-arvoa, voidaan liikutella tarkasteltavaa aluetta ja muuttamalla arvoa Sample Rate voidaan muuttaa kaistanleveyttä. Oletusnäkymästä poiketen tässä on vielä laitettu Average-valinta päälle, jolloin satunnaiset piikit jäävät vaimeammiksi ja signaalista tulee vakaampi ja helpommin tarkasteltava. Kuvassa 18 kaistanleveys on muutettu arvoon 1MHz ja tarkasteluun on otettu vain yksi radiokanava taajuudella 94,8MHz.



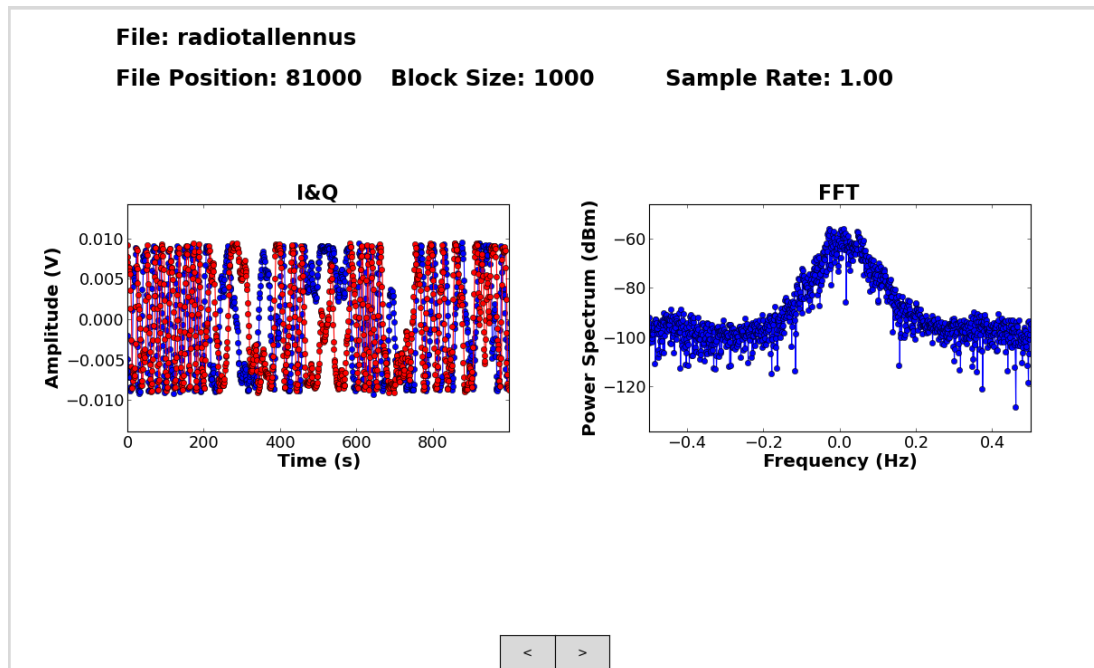
Kuva 18. 94,8MHz

Tässä näemme myös selkeähdöt sivunauhat keskitaajuuden molemmiin puolin. Jatko-tarkastelua, eli signaalin tarkempaa analysointia varten voimme suoraan terminaalista tallentaa radiolähetystä tiedostoon. Tähän tarvitsemme radiolähetyksen taajuuden f , joka on 94,8MHz, haluttujen näytteiden määrän N , joka tässä tapauksessa valitaan arvoon 10 000 000 ja tiedoston nimen. Nimeksi valitsin ”radiotallennus”. Näytteenottotiheys on oletuksena 1 000 000 näytettä sekunnissa, joten näytteen pituudeksi tulee 10 sekuntia. Tiheyttä voi toki myös muuttaa erillisellä parametrilla.

```
uhd_rx_cfile -f 94.8M -N 10M radiotallennus
```

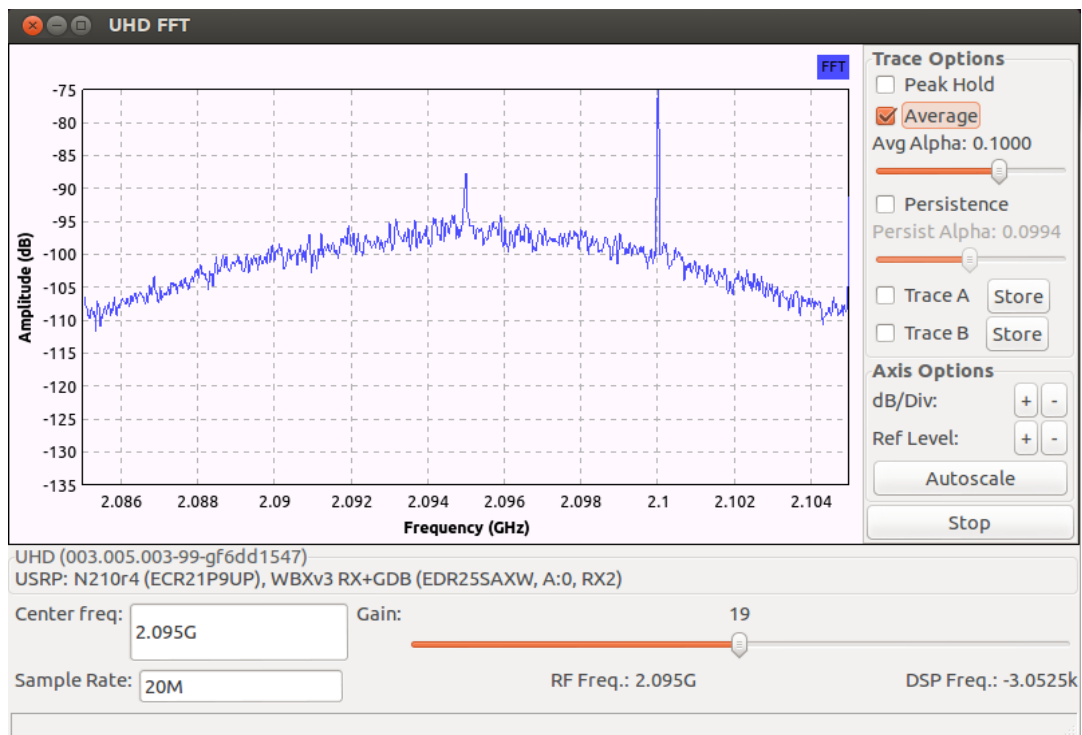
Tarkastellaan tätä tiedostoa myöhemmin lisää, mutta jo terminaalista löytyy useita komentoja, jolla tietoja saadaan avattua. Yksi näistä on komento `gr_plot_fft`. Tällä komennolla nähdään eri näytteet graafisessa muodossa kussakin eri tiedoston kohdassa. Kuvakaappaus kuvana 19.

```
gr_plot_fft radiotallennus
```

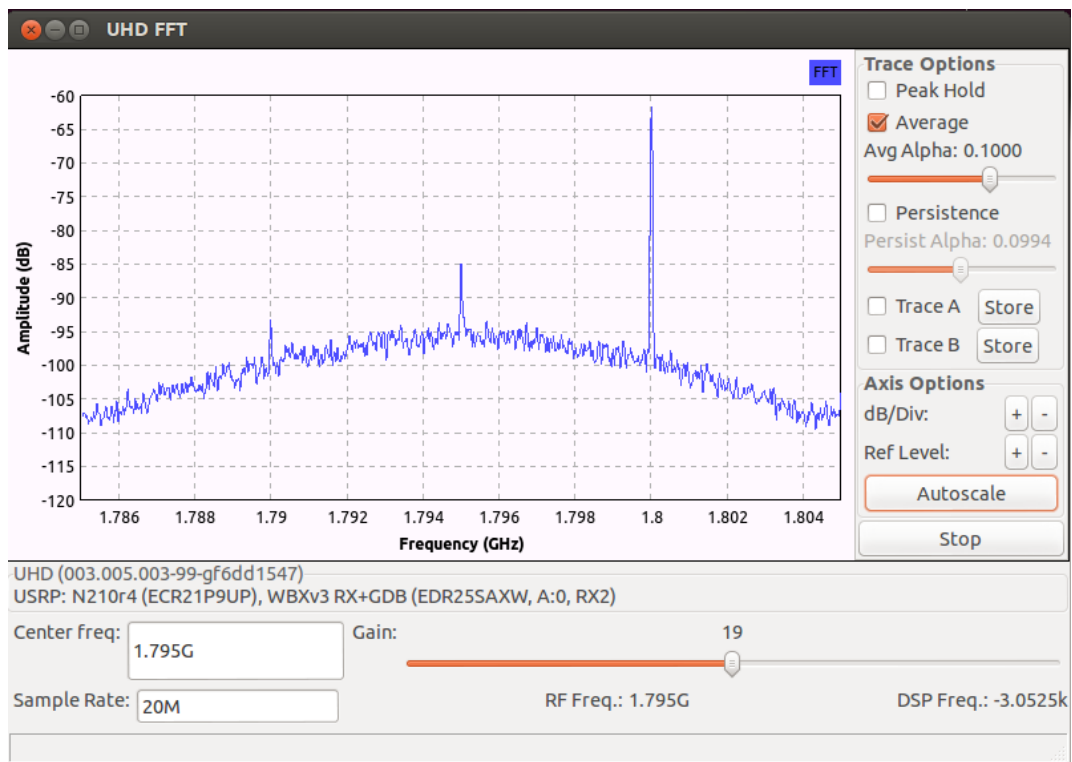


Kuva 19. gr_plot_fft

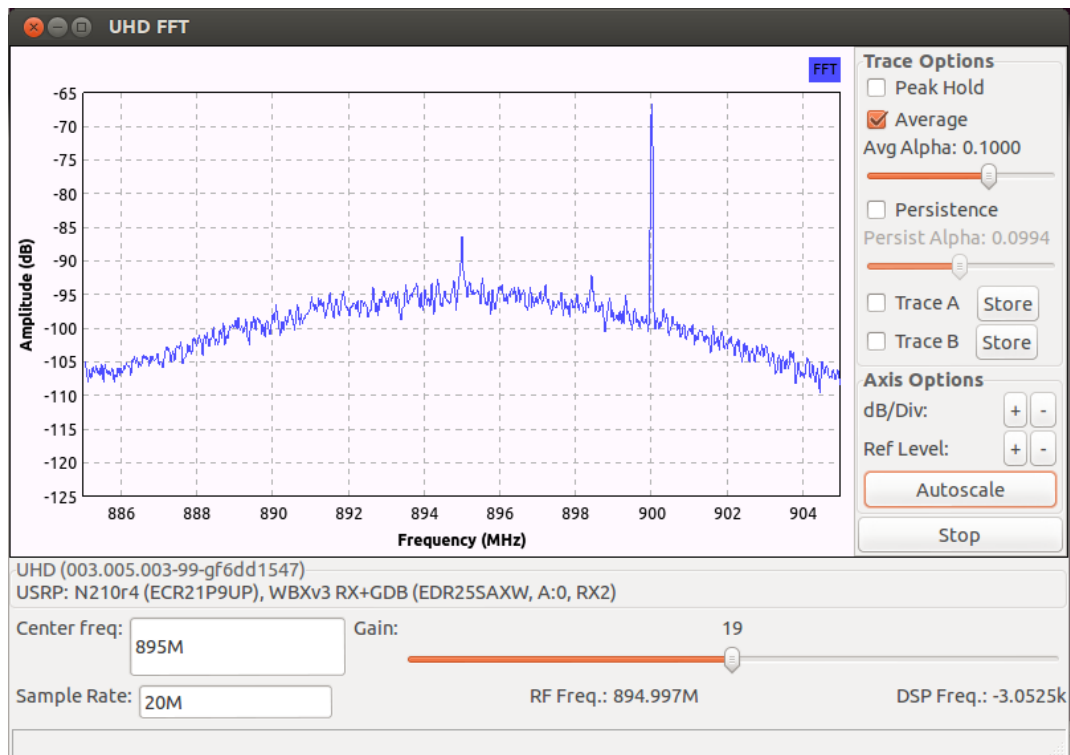
Tässä työssä keskitytään lähinnä FM-taajuuksiin, mutta USRP N210 pystyy aina 2,2 GHz taajuuksiin asti. Näin nähdään esimerkiksi 3G ja 4G taajuudet selkeinä piikkeinä. Keskitäajuudeksi näissä tapauksessa valitsin arvon hieman tarkasteltavaa taajuutta alemmaa, sillä laite itsessään luo näillä taajuuksilla pienen piikin. Kuvissa 20, 21 ja 22 näkyvät 3G-taajuudet 900MHz ja 2100MHz sekä 4G-taajuus 1800MHz.



Kuva 20. 3G 2100MHz.



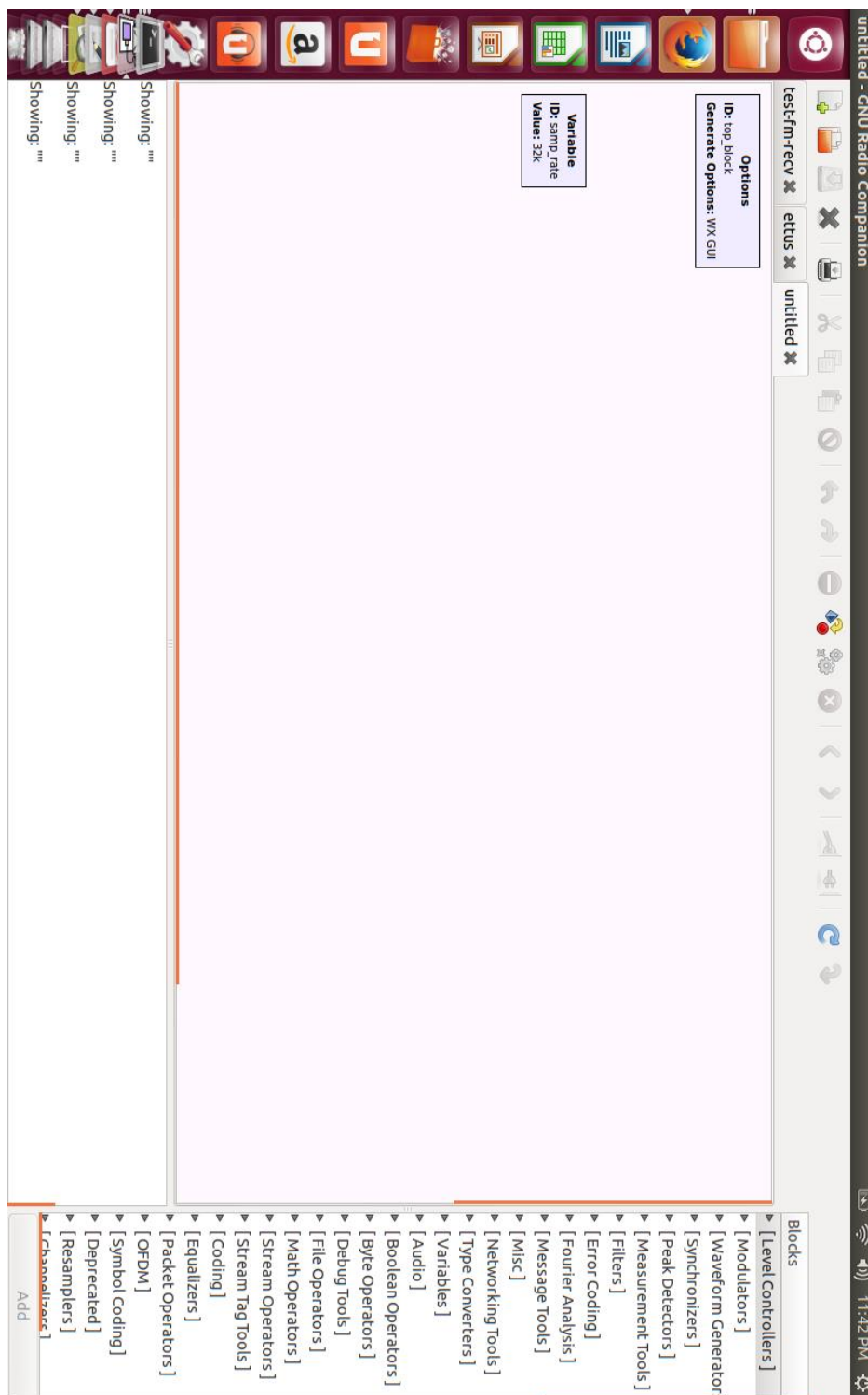
Kuva 21. 4G 1800Mhz.



Kuva 22. 3G 900MHz.

Seuraavaksi käsittelemme ehkä GNU Radion olennaisinta osaa eli GNU Radio Companion-sovellusta. Kun GNU Radio Companionia aletaan käyttää, pitää käyttäjän ymmärtää kaksi termiä. Flow Graph ja Block. Flow Graph on suoraan käännettynä virtauskaavio, eli se kuvaa sisään tulevaa signaalia, sen käsittely/analysointia ja lopulta lähettämistä eteenpäin. Blockit eli lohkot taas ovat virtauskaavion osia, joissa tapahtuu optimitilanteessa vain yksi asia per lohko. Monimutkaisempiakin lohkoja on, mutta perusideana on pitää ne yksinkertaisina. Yksittäinen lohko siis ottaa signaalin sisään, tekee sille esimerkiksi alipäästösuodatuksen ja lähettää suodatetun signaalin taas seuraavalle lohkolle. Virtauskaavion alussa on lohko, joka määrittelee lähteen (source) Tämä voi olla niin mikrofoni, satunnainen tai halutunlainen generoitu aalto, tiedosto tai ehkä mielenkiintoisimmillaan suoraan ilmasta poimittu radiosignaali. Tätä signaalia voidaan sitten eri lohkoissa suodattaa, moduloida, vahvistaa, tahdistaa, taajuuskorjata tai oikeastaan mitä tahansa, mitä radiosignaalille perinteisissä radiolaitteissakin on voinut tehdä. Lohkoja voi myös koodata itse lisää, mikäli joidain toiminnallisuutta ei vielä löydy. Signaalia voidaan myös katsella graafisesti eri virtauskaavion kohdista samanaikaisesti ja parametreja voidaan muuttaa lennosta. Käsitelty signaali voidaan taas ohjata esimerkiksi tietokoneen äänikortille, tiedostoon tai vaikkapa omaksi radiolähetykseksi.

Kuvassa 23 on GNU Radio Companionin näkymä. Oikeassa reunassa on listattuna käytettävissä olevat valmiit lohkot, keskellä suuri vaalea alue on virtauskaaviolle varattuna ja alalaitaan tulee koodia suoritettaessa näkyvää palautetta. Kaksi jo näkyvää lohkoa ovat perusominaisuuksia, sekä muuttujaa `samp_rate` varten. Muut lohkot voivat käyttää tätä näytteenottotaajuutta yhteisesti, jolloin sitä ei tarvitse määritellä kaikille erikseen.



Kuva 23. GNU Radio Companion.

Kuvassa 24 on yksinkertainen esimerkki. Tässä tyhjään virtauskaavioon on lisätty 5 lohkoa, joiden roolin käyn tässä läpi. Lisäksi näkyvillä on värikartta, josta nähdään millaista muotoa eri lohkojen lähettämät ja vastaanottamat arvot ovat. Tässä siis Signal Source-lohkon out-portin ja Rational Resampler-lohkon välillä on ristiriita, joka näkyy myös punaisesta nuolesta. Ristiriita saadaan korjattua valitsemalla haluttu loh-

ko ja painamalla nuolinäppäintä ylös tai alaspäin. Tällöin portin väri vaihtuu ja lohko tarjoaa itse sille sopivan seuraavan tyypin. Jokaisen lohkon ominaisuudet saadaan myös näkyville kaksoispainalluksella. Tässä kuvassa avattuna on Signal Source lohko. Lohkon porttien tyyppejä saadaan vaihdettua myös täältä. Lisäksi voidaan muuttaa myös muita lohkon ominaisuuksia. Kaikki värillisellä pohjalla olevat arvot haluat väriä vastaavan arvon, eli tässä tapauksessa 32 bittisen liukuluvun. Lisätietona sanottakoon, että kaikkia alleviivattuja parametreja voidaan muuttaa lennosta eli kun koodia jo suoritetaan. Käydään vielä eri lohkot yksitellen läpi.

Signal Source: Tämä on niin sanottu lähdelohko, joka tuottaa kosiniaaltoja. Näytteenottotaajuus saadaan suoraan `samp_rate` muuttujasta. Taajuudeksi on valittu muuttuja `f`. Lisäksi amplitudille on määritetty arvoksi 500mA.

Rational Resampler: Porttien tyypin vaihdon jälkeen edellisen lohkon tuottama signaali tuodaan tälle lohkolle, jotta näytteenottotaajuus saadaan muutettua lopulliseen muotoonsa. Sisään tuleva 8kHz ei kelpaa sillä signaali on tarkoitus ajaa tietokoneen äänikortille, joka ei tue kyseistä taajuutta. Syöttämällä decimation-kohtaan sisään tulevan taajuuden ja interpolation kohtaan lähetettävän taajuuden saadaan muutos tehtyä. Yhtä hyvin decimation olisi voitu jättää arvoon yksi ja interpolation asettaa arvoon kuusi, sillä vain lukujen suhde merkitsee. Näin näytteenottotaajuus on kuusinkertaistettu.

Multiply Const: Signaalin vahvistus kertoimella 1,2.

Audio Sink: Tämä on nielu eli lohko josta signaali poistuu lohkokaaviolta fyysiselle laitteelle. Tässä tapauksessa laite on äänikortti. Ominaisuuksista on valittu yksi äänikortin tukemista taajuuksista, eli 48kHz.

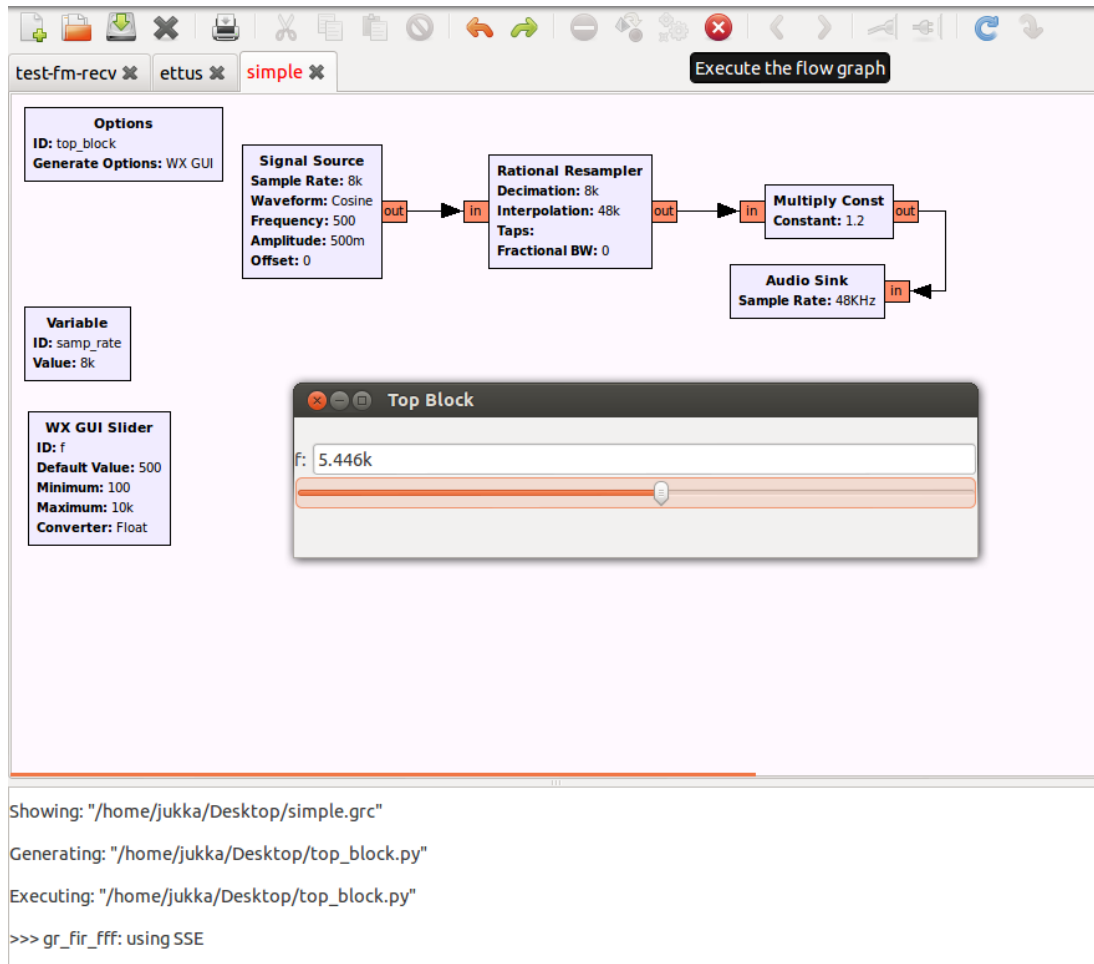
WX GUI Slider: (graphical user interface) Tämä lohko kuvaa muuttujaa, jonka arvoa voidaan muuttaa lennosta, kun koodia suoritetaan. ID on `f`, joka on siis jo määritetty lohkon Signal Source taajuudeksi. Oletusarvoksi on asetettu 500, miniarvoksi 100, maksimiarvoksi 10000 ja portaitten lukumääräksi 100.



Kuva 24. GNU Radio Companion käytössä.

Mikäli käytössä ei olisi fyysistä laitetta jolle signaali ajetaan, vaan sink-lohkona olisi esimerkiksi oskilloskooppi vastaava lohko, pitäisi se huomioida erillisellä throttle-lohkolla. Kun käytössä ei ole fyysisen laitteen omaa kelloa virtauskaavio ajaa itseään kaikella saatavilla olevilla resursseilla, joten seurauksena on tietokoneen hyytyminen. Throttle-lohkolla tuo kellotaajuus saadaan asetettua itse.

Kun virtauskaavio nyt suoritetaan, saadaan näkyviin taajuutta kuvaava palkki, jota voidaan siis liikutella samalla kun kaiuttimista kuuluu taajuutta vastaavaa vینگuntaa. Näkymä kuvassa 25.



Kuva 25. GNU Radio Companion simple.

Seuraavassa esimerkissä (kuva 26) kootaan ja avataan toimiva FM-vastaanotin. Käydään aluksi läpi kuvassa esiintyvät uudet lohkot.

UHD: USRP Source: Tämän lohkon avulla päästään käsiksi USRP-laitteen näytteisiin. Laitetta ei enää tässä vaiheessa tarvitse erikseen määritellä, vaan tietoihin pitää syöttää vain haluttu näytteenottotaajuus, keskitaajuus sekä vahvistus. Tässä esimerkissä näytteenottotaajuus ja keskitaajuus tulevat suoraan muuttujista ja vahvistus on syötetty käsin.

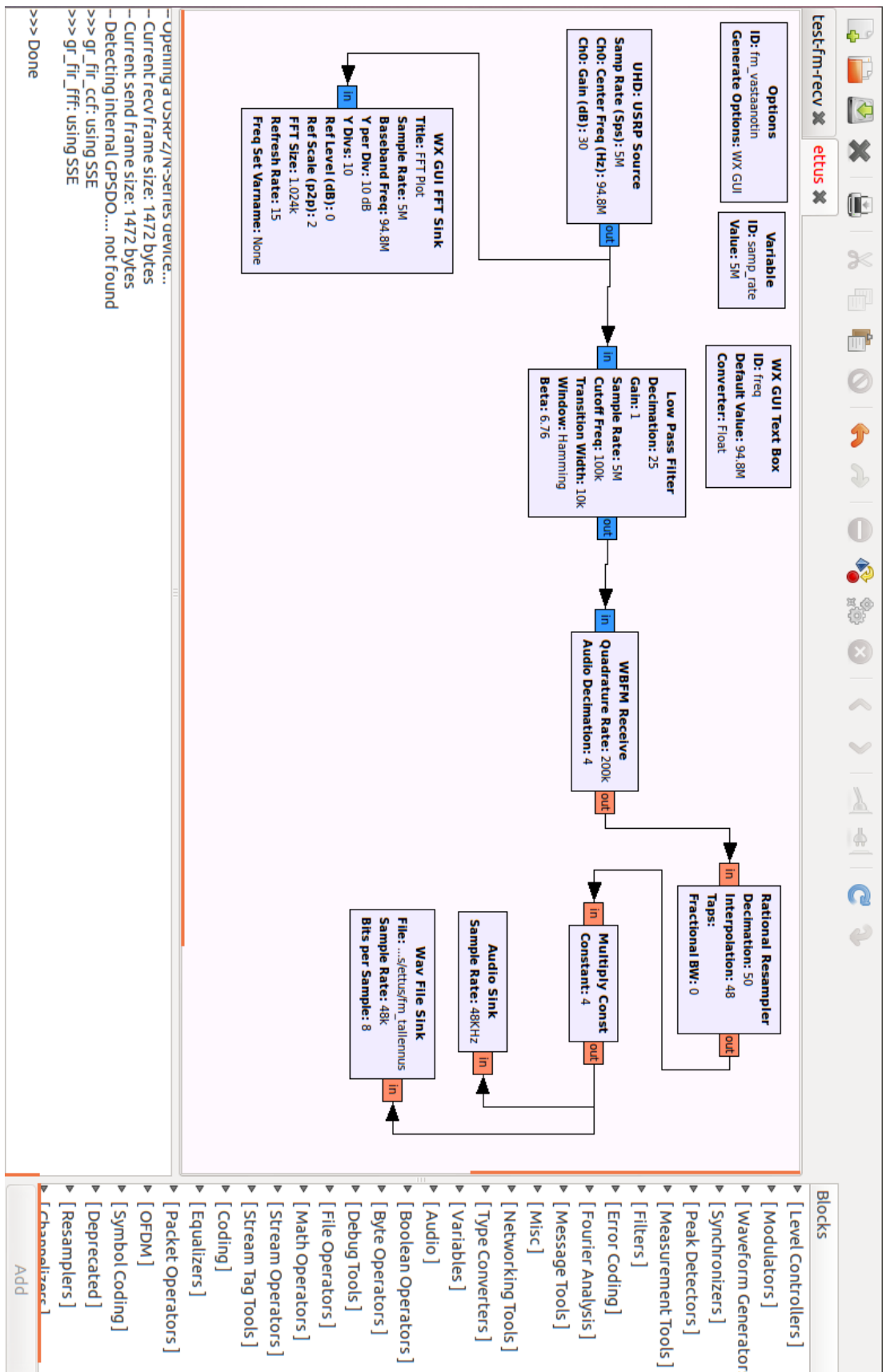
WX GU FFT Sink: (fast Fourier transform) Graafinen lohko, jonka avulla nähdään USRP laitteelta tuleva RF-spektri.

Low Pass Filter: Alipäästösuodatin. Määritellään Cutoff-taajuudeksi puolet kanavan kaistanleveydestä (100kHz) ja Transition width kohtaan 10kHz. Ilman erillistä lohkoa saadaan myös näytteenottotaajuutta pienennettyä. Tässä on tehty jako luvulla 25, eli kaistanleveys putoaa arvosta 5MHz arvoon 200kHz.

WBFM (Wide Band Frequency Modulated) receive: Purkaa radiosignaalin moduloinnin. Quadrature-arvoiksi sisääntulevan signaalin taajuus eli 200kHz. Samalla loholla voidaan jälleen harventaa pienentää näytteenottotaajuutta.

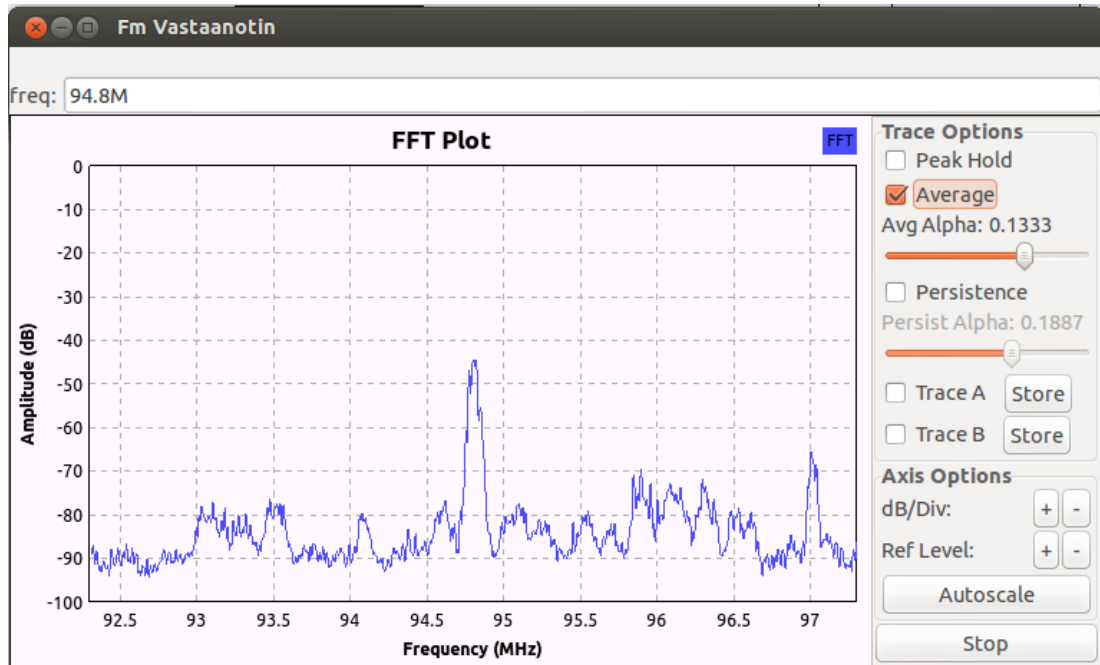
Wav (Waveform Audio File Format) File Sink: Tällä loholla saadaan kuunneltavaa kanavaa myös tallennettua tiedostoon. Ominaisuuksista pitää valita talletuskohde sekä näytteenottotaajuus. Taajuudeksi on valittu äänikortin tukema 48kHz.

WX GUI Text Box: Muuttuja, jota voidaan säätää suorituksen aikana. Tässä tapauksessa säätää keskitaajuutta.

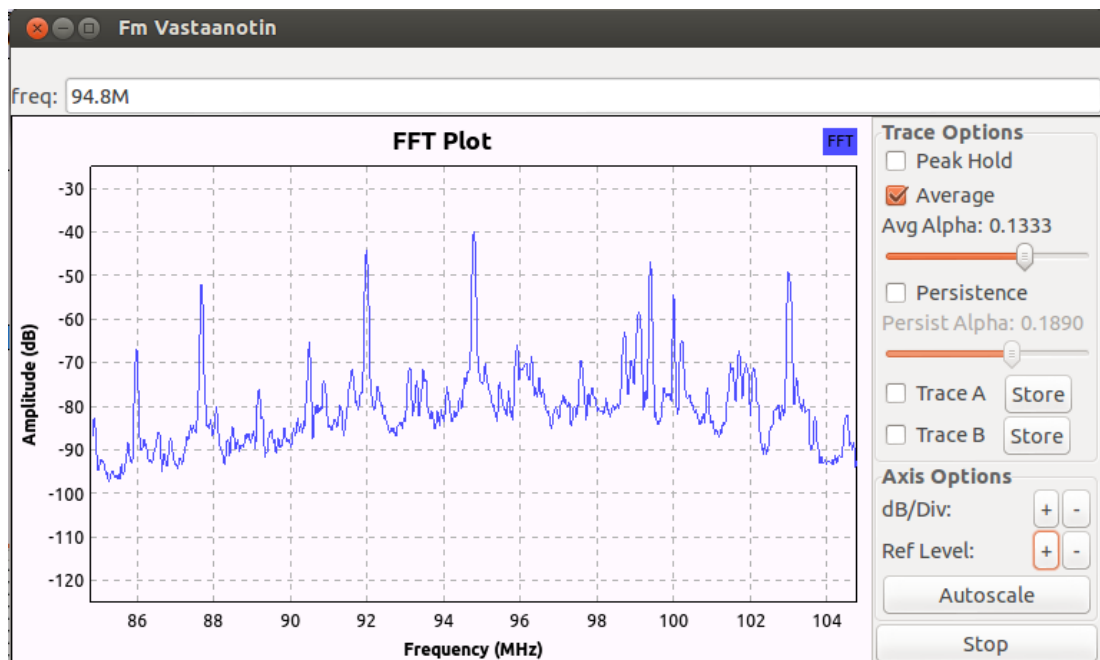


Kuva 26. FM-vastaanotin.

Tarkastellaan nyt, mitä FFT sink näyttää, kun virtauskaavio suoritetaan. Kuvassa 27 näkyy FM-spektri taajuudella 94,8MHz ja 5 MHz sen ympäriltä. Kuvassa 28 on sama tilanne 20MHz:n kaistanleveydellä.



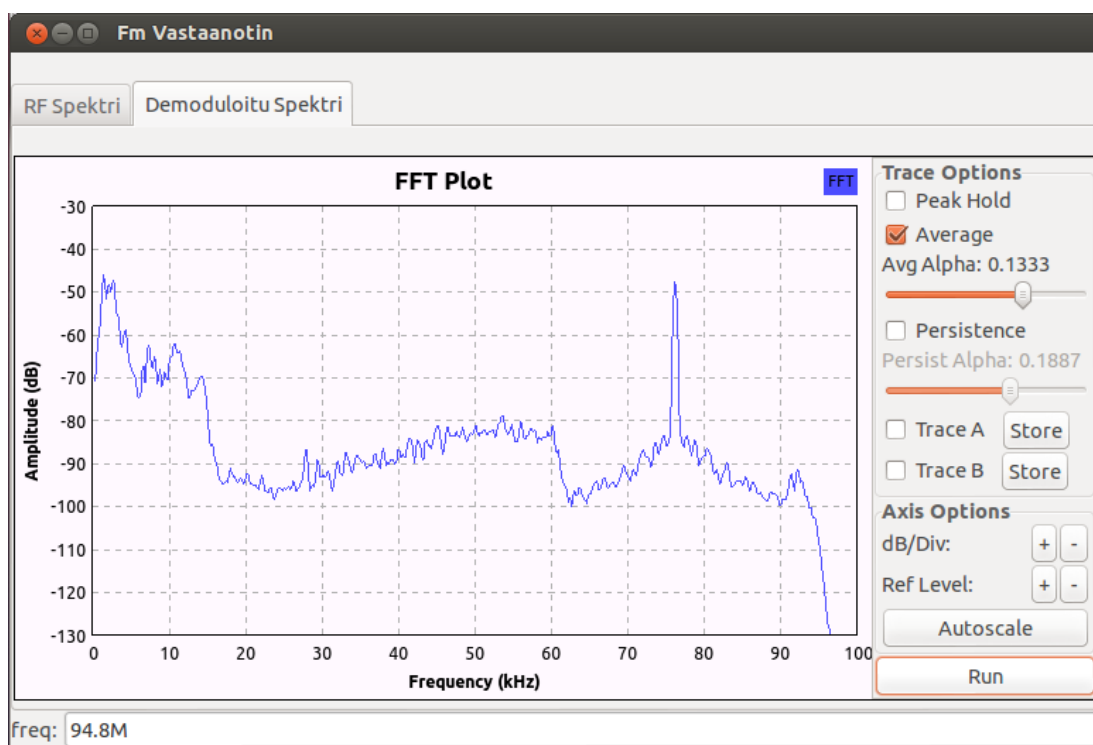
Kuva 27. FFT sink 5MHz kaistanleveydellä.



Kuva 28. FFT sink 20MHz kaistanleveydellä.

Muokataanpa virtauskaaviota vielä sen verran, että saadaan myös purettu signaali esille graafisessa muodossa. Tätä varten lisätään toinen WX GUI FFT Sink-lohko

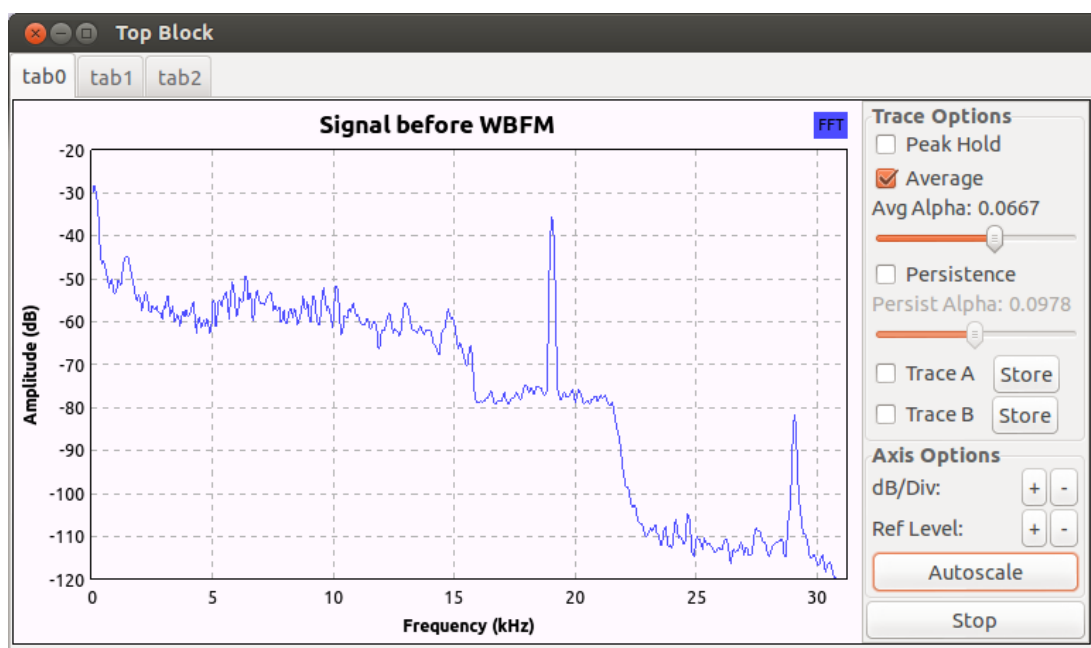
WBFM-lohkon perään. Visuaalisuuden parantamiseksi ja selkeyttämiseksi lisää myös WX GUI Notebook-lohkon. Tämä lohko lisää suoritusvaiheeseen välilehtiä. Välilehtien otsikon määritellään lohkon ominaisuuksiin ja linkit muistioon pitää lisätä myös molempiin FFT-viemäriin. Muistion ID on notebook_0, joten ensimmäinen FFT-viemäri viittaa sen ensimmäiseen välilehteen notebook-arvolla notebook_0,0. Jälkimmäisen FFT-viemärin notebook-arvo on notebook_0,1. Ensimmäinen välilehti ei ole muuttunut mihinkään, mutta nyt toisella välilehdellä (joka näkyy kuvassa 30) nähdään demoduloitu spektri. Kuvassa 31 on tämän tilanteen virtauskaavio. Optimitilanteesta tästä olisi erotettavissa kaikki radiolähetysten komponentit, mutta tässä erotettavissa ovat lähinnä monoääni ja stereoääni.



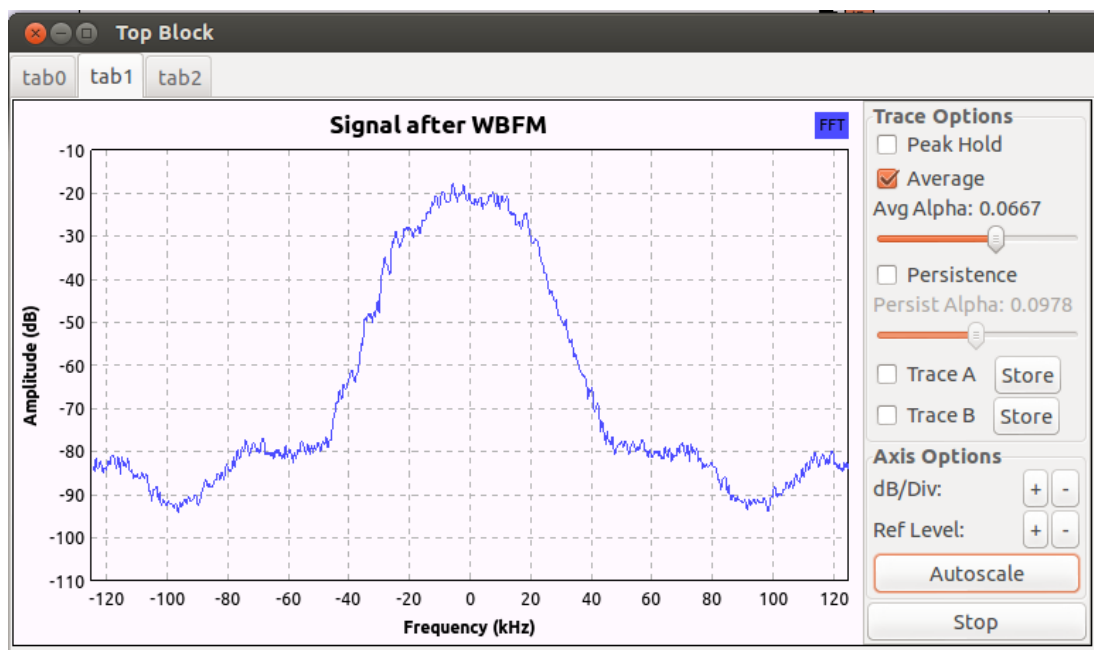
Kuva 30. Demoduloitu spektri.

Kuva 31. Virtauskaavio välilehden luovalla lohkolla.

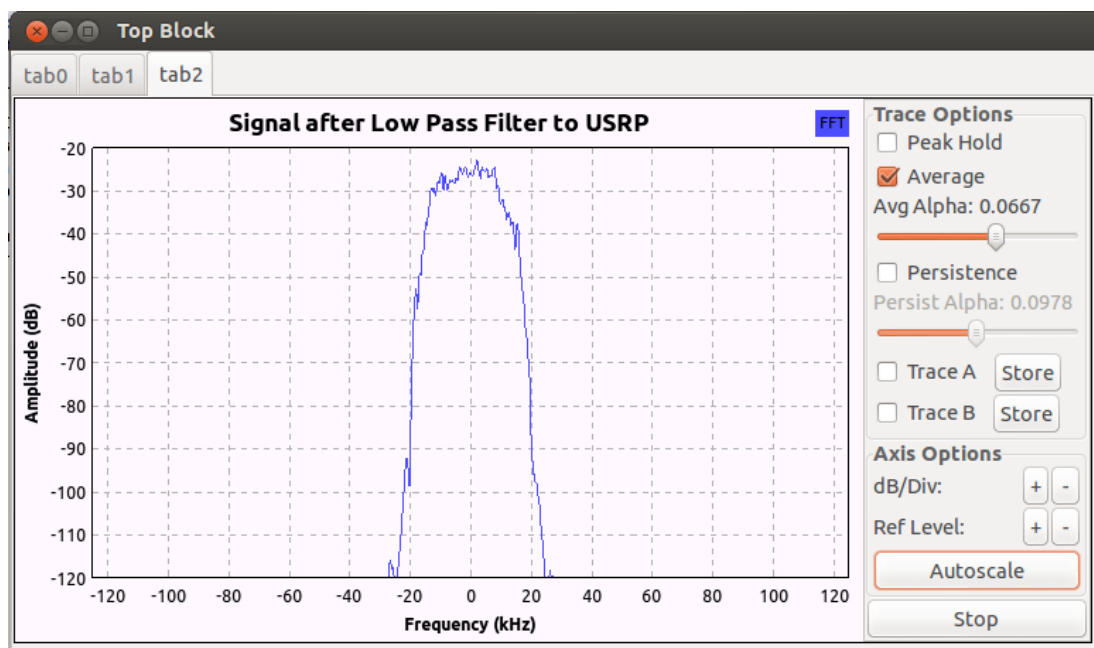
Seuraavassa virtauskaaviossa (kuva 35) olen kasannut lohkoista FM-lähettimen. Tässä UHD: USRP (USRP Hardware Driver) (Universal Software Radio Peripheral) Sink-lohko on poissa harmaana, eli poissa käytöstä, koska käytössäni ei ole lähetykseen soveltuvaa antennia. Kaikki kuitenkin toimii, eli aktivoimalla työkalurivillä olevasta töpselipainikkeesta tuon lohkon ja vaihtamalla radiolaitteeseen oikean antennin voisin mennä esimerkiksi ulos autooni kuuntelemaan omaa lähetystäni. Tähän lohkoon määritellään lähetettävä kaistanleveys, lähetystaajuus ja vahvistus. Toisena uutena lohkona on lähteenä toimiva Wav File Source. Lähdesignaali tulee siis aiemmin tallentamastamme äänitiedostosta. Toisena uutena lohkona on WBFM Transmit-lohko, joka moduloi signaalin oikeaan muotoon. Havainnollistamisen helpottamiseksi virtauskaaviossa on myös kolme WX GUI FFT Sink-lohkoa (Kuvat 32,33 ja 34). Yksi kuvaamassa signaalia ennen modulointia, yksi heti sen jälkeen ja viimeinen esittää ulos lähetettävää signaalia. Kunkin tilanteen ruutukaappaukset jälleen tässä:



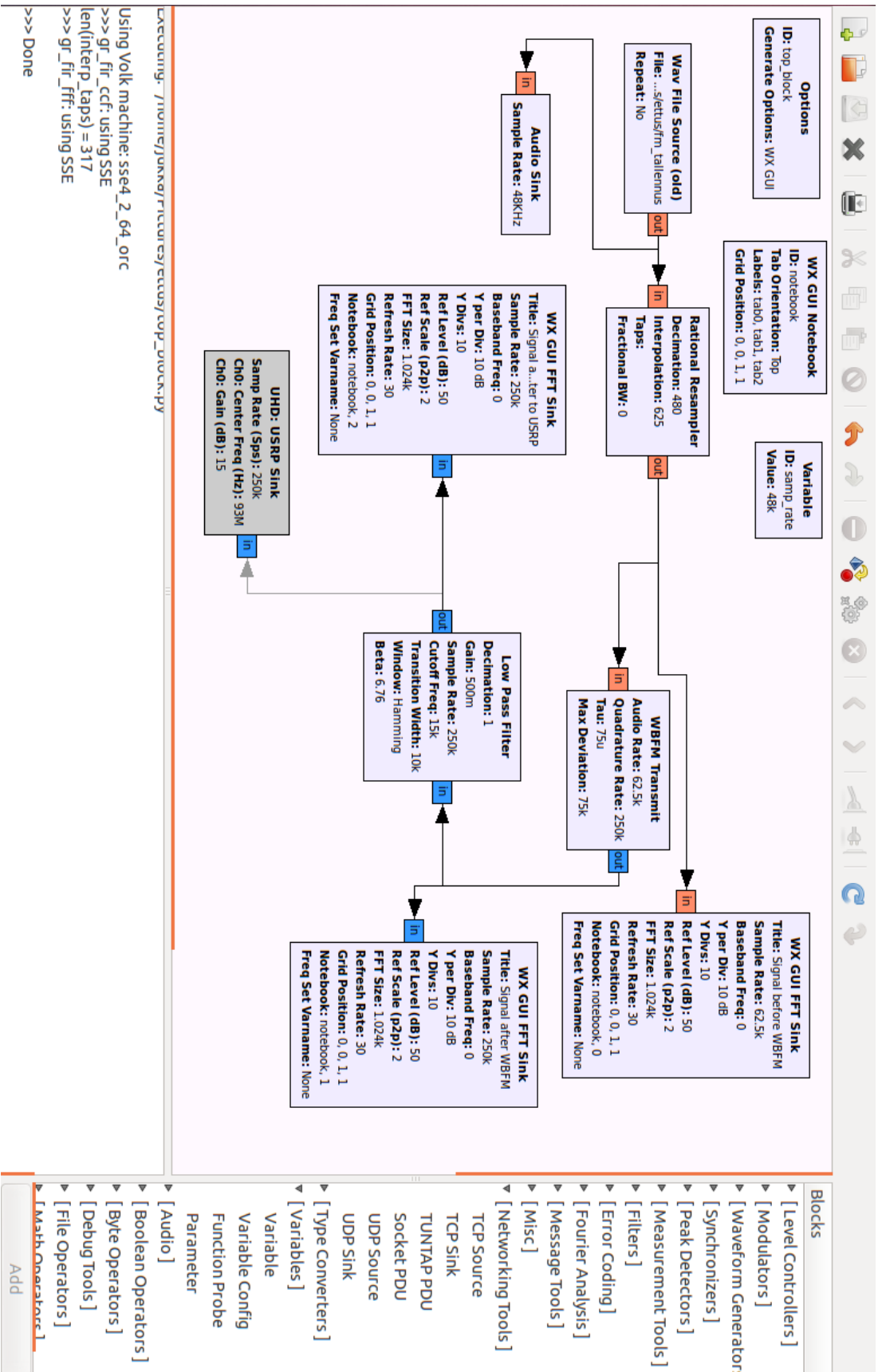
Kuva 32. Signaali ennen WBFM-lohkoa.



Kuva 33. Signaali WBFM-lohkon jälkeen.



Kuva 34. Signaali alipäästösuodattimen jälkeen.



Kuva 35. FM-lähetin

4 YHTEENVETO

Opinnäytetyössä perehdyin laajasti radiotekniikan perusteisiin ja tutuistuin radiotoiminnan kannalta olennaisimpiin tekniikoihin. Työssä pääsin myös kokeilemaan näiden tekniikoiden toimintaa käytännössä hyödyntäen ja soveltaen niitä ohjelmistoradioiden maailmaan.

Käytännön testit havainnollistavat selvästi teoriassa opittuja asioita ja toivat niihin uuden näkökulman. Työn aikana opin myös käyttämään GNU Radio Companionia ja huomasin sillä työskentelyn olevan alusta asti melko helposti lähestyttävää ja selkeää.

Opinnäytetyön tekemisen aikana tietämykseni ja ymmärrykseni radiotoiminnasta nousi selvästi ja osaan nyt GNU Radion ja Ettus Researchin radiolaitteen avulla luoda oman pienen radiokanavani tai käsitellä virallisia radiolähetystyökaluja. Lähettäminen jäi vääränlaisen antennin vuoksi käytännössä testaamatta, mutta työssä on senkin puolesta kaikki valmiina.

Suosittelen GNU Radioon tutustumista radioamatööreille ja kaikille radiotoiminnasta kiinnostuneille sekä satakunnan ammattikorkeakoulun opetukseen radiotekniikan ja tietoliikennejärjestelmien kurssien yhteydessä.

LÄHTEET

- [1] Räisänen, A., Lehto, A. 2011. Radiotekniikan perusteet. Helsinki: Gaudeamus.
- [2] Lehto A. 2006. Radioaaltojen maailma. Helsinki: Otatieto/Oy Yliopistokustannus University Press Finland Ltd.
- [3] The ARRL Handbook. 2012. Newington, CT 06111 USA. The national association for Amateur Radio™.
- [4] Kooste Erkki Rupan kurssimateriaalista. Koostanut Saku Rantamäki. 2008.
- [5] Wikipedian www-sivut. Viitattu 15.10.2013. <http://fi.wikipedia.org>
- [6] Wikipedian www-sivut. Viitattu 15.10.2013. <http://en.wikipedia.org>
- [7] Tiede, 2013, nro 6, s. 6. Helsinki: Tieteen tiedotus ry. / Sanoma Magazines Finland Oy.
- [8] David J. Griffiths: 1999. Introduction to Electrodynamics, Prentice Hall.
- [9] GNU Radio-projektin www-sivut. Viitattu 1.10.2013.
<http://gnuradio.org/redmine/projects/gnuradio/wiki>
- [10] Radioamatöörien wikin www-sivut. Viitattu 5.11.2013. <http://wiki.ham.fi/>